Giordano Bruno Wolaniuk

Medidor de Energia em Média Tensão

Curitiba
2011

Giordano Bruno Wolaniuk

Medidor de Energia em Média Tensão

Dissertação apresentada como requisito final à obtenção do grau de Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia, no Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia (PRODETEC), do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), e Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), na linha de Pesquisa Geração e Transferência de Tecnologia.

Orientador: Vóldi Costa Zambenedetti

Curitiba
2011

Wolaniuk, Giordano Bruno
Medidor de Energia em Média Tensão / Giordano Bruno Wolaniuk. Curitiba, 2011.
70 f. :tabs., figs., grafs.

Orientador: Prof. Dr. Vóldi Costa Zambenedetti

Dissertação (Mestrado) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia - PRODETEC.

1. Medição de Energia

2. Perdas não técnicas

3. Média Tensão

I. Zambenedetti, Vóldi Costa. II. Título. III. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC.

CDD 621.3745

TERMO DE APROVAÇÃO

GIORDANO BRUNO WOLANIUK

MEDIDOR DE ENERGIA EM MÉDIA TENSÃO

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito para obtenção do grau de Mestre, no Mestrado Profissional do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Tecnologia (PRODETEC), realização do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), pela seguinte banca examinadora:

ORIENTADOR: Prof. Dr. Vóldi Costa Zambenedetti
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

Prof. Dr. Rodrigo Jardim Riella
Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)

Prof. Dr. James Alexandre Baraniuk
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)

Curitiba, 22 de dezembro de 2011.

À Alexandra, por ser um exemplo de vida.

Epígrafe

A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim único, melhorar a humanidade

Nikola Tesla

Agradecimentos

Agradeço ao LACTEC por proporcionar bolsa para cobrir os custos desta pós-graduação e pela oportunidade de trabalhar neste projeto.

Agradeço também ao meu orientador Vóldi Costa Zambenedetti por dispensar tempo a este trabalho, aos pesquisadores que aceitaram este desafio: Reginato Domingos Scremin; Guilherme Pereira de Resende; Vilson Rodrigo Mognon; Paulo Roberto Machado e Christian Schultz. Também ao Mario Klimkowski, por esclarece muitos pontos sobre a estrutura de distribuição de energia elétrica e à equipe técnica formada por Alexandre Rosa Lemos e Adelaide de Fátima Ribeiro.

Não poderia deixar de agradecer as empresas Balestro, Engro e Escelsa, parceiras do LACTEC no desenvolvimento desta nova tecnologia.

Sobretudo, agradeço a Deus por proporcionar tamanha oportunidade de aprendizado.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um medidor de energia elétrica para uso em redes aéreas de distribuição de até 34,5 kV. O protótipo desenvolvido traz um novo paradigma para a medição de energia em médias tensões, com equipamentos desenvolvidos especificamente para este uso. A redução de peso, a flexibilidade e a facilidade de instalação proporcionadas pelo novo medidor fazem do equipamento uma ótima ferramenta para análise de perdas não técnicas. Não é necessário desligar o ramal da unidade consumidora, não há alarde de instalação do novo equipamento e possíveis fraudes podem ser detectadas pela comparação entre este medidor e o medidor convencional presente.

Foi projetado e registrado um invólucro como novo desenho industrial. O invólucro contém um sensor de corrente e um divisor resistivo de tensão. Este divisor é construído com resistores com isolação a alta tensão. O sensor de corrente possui núcleo aberto com uma compensação apropriada para uso em condutores de diferentes diâmetros e alteração de posição.

O medidor foi instalado na empresa de distribuição de energia Escelsa em setembro de 2011 para testes.

Palavras-chave: Medição de Energia, Perdas não técnicas, Média Tensão

Abstract

This work presents the development of an electricity meter for use in the overhead distribution lines of up to 34.5 kV. The prototype developed provides a new paradigm for energy measurement at medium voltages, with equipment developed specifically for this use. The reduction in weight, flexibility and ease of installation provided by the new meter make the device a powerfull tool for analyzing non-technical losses. It is not necessary to disconnect the consumer unit and possible fraud can be detected by comparing this meter and the meter conventional one already installed.

It was designed and registered as a new industrial design casing. The casing contains a current sensor and a divider resistive voltage. This divider is built with resistors of high voltage insulation. The current sensor has core opened with appropriate compensation for use in conductors of different diameters.

The meter was installed in power distribution company Escelsa in September 2011 for testing.

Keywords: Energy Meter, Non Tecnical Losses, High Voltage

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Sumário

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A energia elétrica é essencial à sobrevivência e desenvolvimento das sociedades modernas. Toda a forma de geração conhecida tem grande impacto ao meio natural que se insere. Portanto, o uso racional da energia elétrica significa eficiência no consumo de recursos naturais, o que nos aproximaria da sustentabilidade. Fraudes do sistema de distribuição de energia elétrica impossibilitam a correta análise do consumo e facilitam o desperdício, pois não há cobrança pelo consumo.

A Figura 1.1 serve como diretriz para o trabalho e mostra que serão abordados assuntos referentes ao combate a perdas no sistema de distribuição de energia.

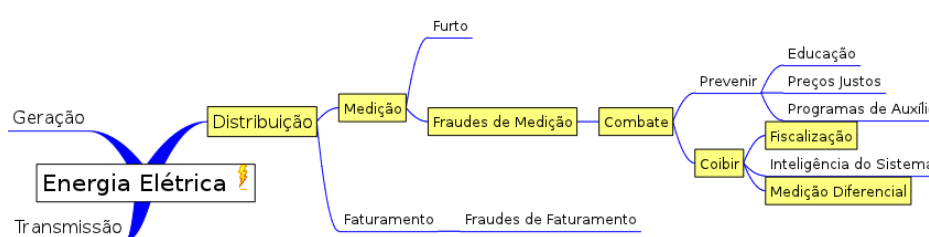



Figura 1.1: Mapa de referência dos assuntos discutidos no trabalho (Fonte: Elaboração própria)

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estima que as perdas na rede de distribuição elétrica brasileira são responsáveis por 15% da energia elétrica comprada pelas empresas distribuidoras. Estas perdas são subdivididas em perdas técnicas e não técnicas ou comerciais.

Perdas técnicas são inerentes ao processo de transmissão de energia elétrica. Seu tratamento é baseado nas características físicas e de carregamento dos componentes de geração e transporte de energia elétrica pelas redes de transmissão e distribuição envolvidas. Perdas não técnicas ou comerciais estão associadas a erros de medição e leitura, impossibilidade de leitura, fraudes e furtos de energia e relativos a gestão comercial, e representam anualmente 4,5% do mercado nacional de energia elétrica.

A Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica (ABRADEE) faz distinção entre fraude e furto. A fraude ocorre quando há alteração do funcionamento dos equipamentos de medição, visando redução nos registros de demanda e/ou consumo de energia. Dentre as fraudes mais comumente encontradas está a alteração das ligações dos medidores de energia ou de seus transdutores de medição. O furto é a subtração da energia da rede sem medição através de ligação clandestina.

Para consumidores de energia atendidos em baixa tensão, uma das abordagens mais usadas para o combate às perdas comerciais tem sido a completa exteriorização da medição, através de sistemas de medição centralizada, com caixa concentradora de medidores instalada nos postes das concessionárias, conforme a Figura 1.2. Para consumidores atendidos em tensões acima de 2.300 volts, a fiscalização e leitura remota de energia tem sido largamente usadas para este fim.

Figura 1.2: Aplicação de medição exteriorizada em consumidores de baixa tensão (Fonte: Foto do autor)

Os equipamentos de medição de energia existentes que operam em médias tensões, e portanto, para serem aplicados em clientes do Grupo A[1], devem ser munidos de transdutores como transformadores de potencial e transformadores de corrente, pois o medidor continua sendo um equipamento de baixa tensão, mesmo nestes casos.

O conjunto de medição requer ainda certa infraestrutura, que em geral,é instalada dentro da unidade consumidora. Assim, há facilidade de acesso a pessoas não autorizadas pelas concessionárias a estes sistemas de medição de energia.

Atualmente, quando há suspeita de furto de energia ou fraude no sistema de medição,

[1] a Resolução 456 da ANEEL(ANEEL, 2000) especifica por Grupo "A" o agrupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

é feita a inspeção visual dos equipamentos da concessionária instalados na infraestrutura do consumidor. Contudo, fraudes são feitas de maneira cada vez mais sofisticada tanto pela capacidade de ocultação quanto por metodologia empregada. Se a suspeita persiste, a opção de mercado existente para resolver o problema é a instalação de um equipamento de medição no poste da concessionária. Tal equipamento é baseado também em transformadores de tensão e corrente e medidor de energia de baixa tensão.

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de medição exteriorizada de energia para médias tensões até 34.500 volts, passível de instalação por apenas uma pessoa através de vara de manobra e aplicável a redes aéreas. De tamanho reduzido, o novo medidor poderá ser camuflado entre os isoladores de entrada do cliente, evitando que este perceba sua existência e proporcionando menor impacto na poluição visual do ambiente.

A resolução 258 (ANEEL, 2003) regulamenta a medição de energia elétrica exteriorizada, citando como benefícios a maior eficiência nos processos de leituras, minimização de casos de faturamento por estimativa e maior privacidade do consumidor. A consequência direta é o aprimoramento do relacionamento entre prestador de serviço e consumidor.

Como resultado espera-se que a existência deste equipamento torne menos atraente atitudes ilícitas de adulteração dos sistemas de distribuição, e que um novo paradigma para medição de energia em média tensão baseada neste equipamento torne-se vigente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é a criação de um sistema de medição de energia exteriorizado a ser aplicado no aparelho de distribuição de energia de média tensão (entre 2,3 e 34,5 kV) com exatidão suficiente para avaliar a existência de fraude no sistema de medição existente.

O produto final esperado é a validação do novo sistema de medição de energia em média

tensão por aplicação em caso real e comparação com o sistema pré-existente. Além disso, a avaliação da possibilidade de uso do novo equipamento para faturamento, visto que possui diversas vantagens frente ao convencional, como menor custo e facilidade de instalação, além da impossibilidade de fraude.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliação da melhor topologia e dos melhores sensores para o novo equipamento;
- Facilidade de instalação, manutenção e leitura da dados;
- Garantir a integridade física do sistema elétrico, dos operadores e dos usuários;
- Possibilitar a integração com as futuras redes inteligentes, conhecidas por *Smart-Grids*, proporcionando um meio de transmissão de dados flexível.

1.3 Estrutura da Dissertação

O presente capítulo foi uma introdução ao problema e a apresentação da proposta como possível solução. O restante da dissertação está organizado em quatro partes, a saber:

- Medição de Energia em Média Tensão: Trata dos sistemas de distribuição de energia e sistemas de medição de grandezas elétricas em média tensão;
- Metodologia: Apresenta-se uma descrição do protótipo proposto;
- Resultados: Mostram-se os resultados obtidos pelo protótipo em laboratório e em campo;
- Conclusão: Conclui-se o trabalho e são apresentadas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Medição de Energia em Média Tensão: Contexto Atual

2.1 Faturamento para Unidades Consumidoras Abastecidas por Média Tensão

Existem duas classes de despesas que determinam o custo total de geração, transmissão e distribuição de energia:

1. Itens de investimento de capitais: despesas anuais das concessionárias de energia, provenientes de equipamentos de geração, transmissão e distribuição, propriedades e construções;

2. Operação e manutenção do sistema: combustível, folhas de pagamentos, renovações, aluguéis e outros numerosos itens contribuem para os custos de operação, manutenção e administração dos sistemas.

Para faturamento de consumidor individual de eletricidade, a concessionária considera o dimensionamento do custo total do abastecimento como determinado pelo capital investido, pelos custos operacionais e despesas de manutenção. Consumidores de grande porte

demandam grande capital de investimento por parte da concessionária no sistema de fornecimento. Já em consumidores de menor porte, os custos de operação e manutenção são mais importantes.

Segundo o módulo 5 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (ANEEL, 2011) (Prodist), o faturamento destes dois tipos de cliente pode ser diferente. Enquanto este é caracterizado por cobranças de energia consumida, aquele pode ser tarifado tanto pela energia como pela potência utilizada, já que os custos de fornecimento aumentam com a potência demandada pelas cargas. São as tarifações monômias, apenas sobre a energia, e as tarifações binômias, sobre a energia e a potência. Esta diferenciação ocorre pois ainda não são aplicáveis sistemas acumuladores de energia locais, que possibilitariam um menor investimento na infraestrutura desde a unidade geradora até a unidade consumidora. É o caso dos sistemas de abastecimento de água, em que acumuladores amortecem os impulsos de demanda instantânea dos consumidores (Hage et al., 2011).

A potência utilizada para a tarifação citada anteriormente não é uma simples leitura de um valor instantâneo, mas uma média verificada em intervalos fixos de tempo, geralmente quinze minutos, e recebe a denominação de *Demanda*, cuja unidade de medida também é o quilowat (kW). Já a energia é medida em quilowat hora (kWh).

Além da energia utilizada para gerar trabalho útil nas unidades consumidoras, descrita acima e denominada energia ativa, outro tipo de energia deve ser medida. A energia reativa, proveniente da manutenção de campos elétricos ou magnéticos em cargas indutivas, cargas capacitivas e cargas não lineares. Apesar de não gerar trabalho útil, provoca perdas por aquecimento nos condutores. As unidades usuais das energias reativas são o VArh e o kVArh. Para potências reativas as unidades são o VAr e o kVAr.

A energia reativa é tarifada da mesma forma que a energia ativa, assim como a demanda reativa é tarifada da mesma forma que a demanda ativa.

A Resolução 456 da ANEEL classifica os consumidores pelo nível de tensão em que são atendidos. Unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV são caracterizados pela estruturação tarifária monômia e recebem classificação de grupo "B". Unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2,3 kV a partir de sistema subterrâneo de distribuição são caracterizadas pela estruturação tarifária binômia e são divididos nos subgrupos expressos na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tensões de fornecimento de energia para o Grupo A (Fonte: (ANEEL, 2011))

Subgrupo	Tensão de fornecimento
A1	230 kV ou maior
A2	88 a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 a 44 kV
A4	2,3 a 25 kV
AS	sistema subterrâneo até 2,3 kV

Sendo a energia elétrica definida como integração da potência no domínio do tempo e demanda a potência média sobre um determinado intervalo de tempo, um medidor de energia para média tensão se resume a um medidor de potência ativa e potência reativa, com capacidade de integração e cálculo de média destas grandezas no tempo (Alexander, 1992) e com certa capacidade de memória para armazenar valores máximos sob a denominação de demandas ativas e reativas máximas.

A potência disponível em uma seção de dois terminais de um circuito elétrico é dada pelo produto vetorial da tensão entre os terminais e a corrente elétrica circulante pela seção ($p = vi$). Assim, o medidor de energia deve medir no mínimo duas grandezas com mesma referência de tempo: tensão e corrente.

2.2 Sistemas de Distribuição de Energia em Média Tensão

Os sistemas de distribuição de energia para as tensões relevantes para este projeto (médias tensões até 34,5 kV) tiveram fatores históricos e mercadológicos como os principais determinantes de sua topologia. Anteriormente à criação da ANEEL, a ABRADEE lançara alguns documentos técnicos em que as tensões 13,8 kV, 23 kV e 34,5 kV eram propostas na padronização de tensões nominais para redes aéreas de distribuição[1]. As estruturas de distribuição são regidas, atualmente, pelos Prodist, e mais especificamente, por normas das concessionárias.

Como o enfoque deste trabalho é a medição de energia na rede primária, que deve ser feita próximo ao ponto de conexão do consumidor[2], a parte do sistema de distribuição de interesse está a jusante deste ponto, significando que podemos simplificar a análise do sistema a montante do medidor como um sistema de fontes senoidais em topologia estrela com neutro aterrado, geralmente um transformador, conforme a Figura 2.1.

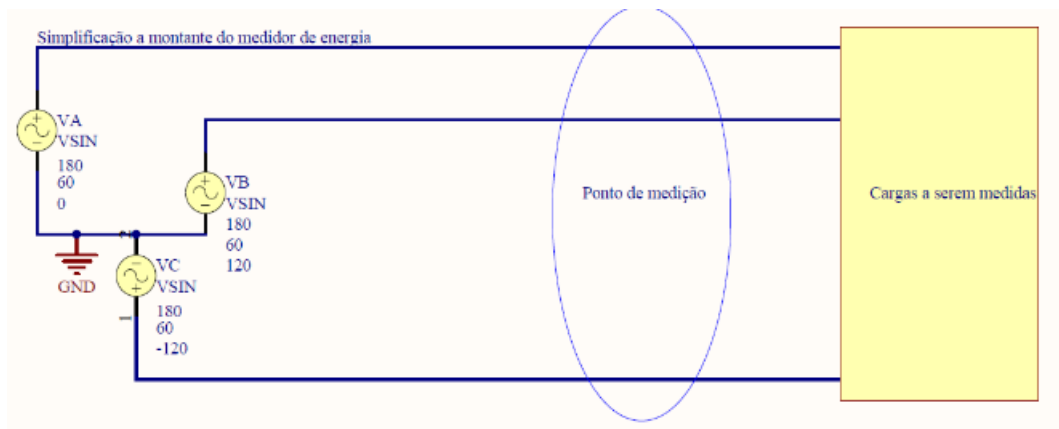



Figura 2.1: Topologia a montante do medidor como em estrela com neutro aterrado (Fonte: Elaboração própria)

[1]RTD - CODI-21.01 - PADRONIZAÇÃO DE ESTRUTURAS PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO URBANAS

[2]PRODIST Parte 3.16.2

Segundo Sen (1996), transformadores em topologia estrela-delta tem seu uso mais comum como abaixadores de tensão, e transformadores delta-estrela como elevadores. Em contraste, as empresas fornecedoras de transformadores para unidades consumidoras alimentadas por médias tensões mostram que até 15 kV geralmente são usados transformadores da topologia delta-estrela aterrada (Figura 2.2). Já consumidores abastecidos até 34,5 kV tem usado transformadores com primário em estrela com neutro aterrado até certo limite de potência e com neutro acessível a partir deste limite. Porém, estes limites e a real topologia dependem das normas da concessionária para o local da aplicação. Estas informações podem ser verificadas nos formulários sobre o assunto respondidos por alguns fornecedores de equipamentos de distribuição de energia (Apêndice A).

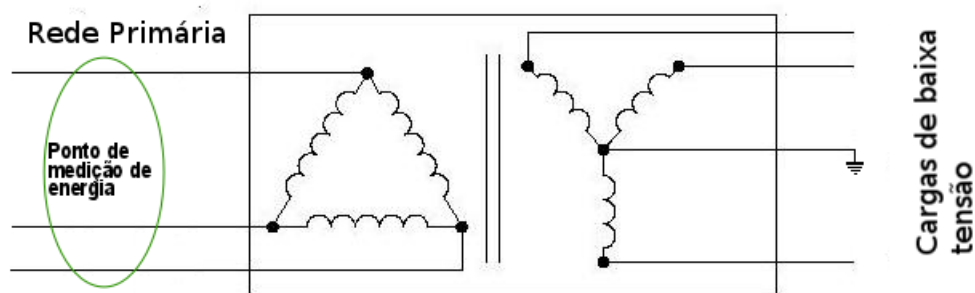



Figura 2.2: Diagrama do transformador típico de unidades consumidoras de 13,8 kV, com indicação do ponto de medição (Fonte: Elaboração própria)

Assim, os cenários de aplicação de medição de energia em média tensão para transformadores de consumidores tem as configurações:

- Carga trifásica com ligação a três fios, ou seja, um transformador com primário em delta;
- Carga trifásica a 4 fios, ou seja, um transformador com primário em estrela;
- Carga monofásica a dois fios, ou seja, transformadores monofásicos;

- Cargas mistas, caso o consumidor possua transformadores trifásicos e monofásicos ligados ao mesmo alimentador.

2.3 Medição de Energia em Média Tensão: Contexto Atual

A partir deste ponto, convém definir que o medidor de energia que tratamos é sempre um sistema estático ou eletrônico. Não será abordado o uso de sistemas eletromecânicos em nenhum dos tópicos que se seguem devido a dificuldade de aplicação a um sistema de média tensão.

O que define a topologia de um medidor de energia é o número de elementos de medição de energia elétrica usados. Cada elemento de medição é composto por um elemento medidor de tensão e um elemento medidor de corrente. Medidores monofásicos são caracterizados por possuírem somente um elemento de medição, já medidores trifásicos possuem dois ou três elementos. Além disso, existem também medidores monofásicos e trifásicos com capacidade de medir corrente de neutro, para verificação de fraudes, porém indisponíveis ao mercado brasileiro.

A abordagem mais comumente usada para medição de energia em unidades consumidoras abastecidas por média tensão é o uso de transformadores de potencial e transformadores de corrente para adequar os níveis das grandezas a medidores de baixa tensão. Tais equipamentos são instalados em uma cabine de medição no ponto de conexão entre unidade consumidora e sistema de distribuição, como a da Figura 2.3. Um dos problemas desta abordagem é o fácil acesso a estes componentes por parte dos consumidores, já que a cabine de medição é instalada na unidade consumidora.

Figura 2.3: Cabine de Medição fornecida pela empresa Engepol (Fonte: www.engepol.com.br)

Um outro problema desta abordagem é o elevado custo de cada um dos transformadores utilizados. Uma unidade consumidora típica necessita de três transfonadores de tensão e três transformadores de corrente. Este custo pode ser reduzido se adotada a simplificação sugerida por Blondel em seu teorema sobre o número de wattímetros necessários para medição de energia em cargas alimentadas por um certo número de fases ou fios:

Teorema 2.3.1 (Blondel) *"A potência total entregue a um sistema de cargas por n condutores é dada pela soma algébrica indicada por n wattímetros inseridos um em cada um dos n fios, sendo a potência de referência de todos os n wattímetros conectados a um ponto comum; esse ponto comum pode ser conectado a um dos n condutores, assim a potência total é dada por n-1 medidores de potência"*[3] *(Alexander, 1992)*

.

[3] traduzido pelo autor

Esta abordagem, porém, reduz o número de informações que o medidor poderia disponibilizar, como a tensão fase-neutro real e a medida de corrente real em um dos condutores.

2.4 Tecnologias elegíveis

Qualquer que seja a metodologia escolhida para a medição de energia na rede primária, há dependência da medição da tensão e da corrente do circuito. A seguir serão citadas algumas das tecnologias usadas para medição de tais grandezas.

2.4.1 Medição de Médias Tensões

Tensões da ordem de quilovolts podem ser medidas de diversas maneiras. A medição direta é possível até 200 kV, a partir desta tensão os erros devidos ao efeito corona são acentuados. A medição direta pode ser feita através de voltímetros eletrostáticos ou através do uso de *gaps* entre materiais condutores, nos quais se observa o fim de centelhamento com o afastamento dos condutores. A medição indireta é possível através de divisores ou de transformadores de potencial (Lucas, 2001).

Uma outra abordagem é a medição do campo elétrico, inferindo a tensão a partir desta informação.

A medição direta não pode ser usada para a medição de energia, pois a informação dada por dispositivos como os voltímetros eletrostáticos ou dispositivos que mostram o fim de centelhamento não são suficientes para diferenciar as potências ativa e reativa. Além disso, voltímetros eletrostáticos são usados para tensões superiores a 10 kV e dispositivos com *gaps* medem somente tensões de pico.

Medição do Campo Elétrico

O uso da diferença de potencial que surgem em dois condutores imersos em um determinado campo elétrico é diretamente proporcional à tensão da fonte do campo elétrico, porém, essa

diferença de potencial também pode variar com a geometria do meio e variáveis ambientais (Filho, 1996).

Isto impossibilita a calibração de um voltímetro em ambiente controlado para ser aplicado em campo, pois a geometria de condutores e distância ao solo não podem ser previstos.

Medição por Transformadores Eletromagnéticos de Potencial

O Transformador de potencial eletromagnético (TP)utiliza os mesmos princípios físicos de transformadores eletromagnéticos comuns, porém proporcionam grande isolação elétrica entre seus enrolamentos primários e secundários. Para aplicação em média tensão em níveis entre 13,8kV e 34,5kV, estes dispositivos tem peso aproximado de 20 kg para uso interno (não sujeito às intempéries). Transformadores de potencial para níveis de tensões elevadas requerem enrolamento primário composto por um número elevado de espiras, o que, na prática, limita a tensão primária nominal a 138 kV(Lucas, 2001). A Figura 2.4 mostra transformadores de potencial típicos usados em cabines de medição de de energia.

Figura 2.4: Transformadores de potencial ABB família TDC5 (Fonte: Manual do dispositivo TDC5 da ABB)

Medição por Divisores Capacitivos de Potencial

Duas capacitâncias podem ser usadas em série como divisor de potencial em correntes alternadas. São construídos para tensões entre 34,5 kV e 765 kV, possuindo derivação intermediária de $5kV$ a $15kV$, conforme a Figura 2.5. Se o sistema é mantido em uma posição fixa e devem ser feitas correções para as capacitâncias parasitas entre o divisor e o ambiente em que foi instalado. A tensão dada pelo divisor capacitivo da Figura 2.5 é dado por:

Tensão em $C_2 = \frac{1/C_2}{(C_1+C_2)/C_1*C_2} * V = \frac{C_1}{C_1+C_2} * V$

Como as capacitâncias devem ser precisamente conhecidas e não podem ter perdas dielétricas, geralmente capacitores de isolamento a ar são usados. Por terem perdas bastante reduzidas, são usados para acoplamento para ondas portadoras de altas frequências em sistemas de comunicação via rede elétrica(de Medeiros Filho, 1983).

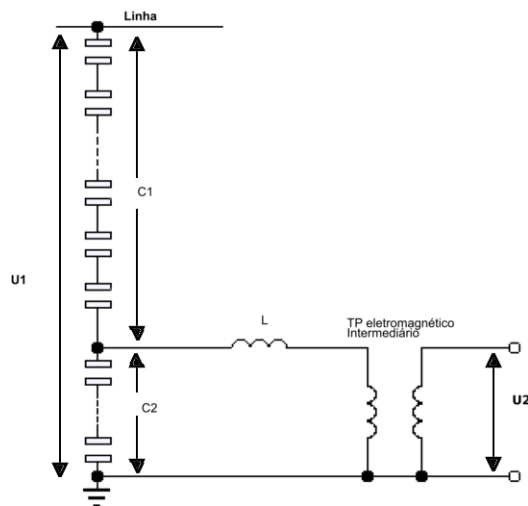



Figura 2.5: Transformadores de potencial capacitivos

Medição por Divisores Resistivos de Potencial

Um Divisor resistivo da ordem de $20k\Omega/V$ pode ser conectado diretamente ao circuito de média tensão e uma fração desta pode ser medida com um voltímetro de baixa tensão (Lucas, 2001).

Devem ser encapsulados em invólucro de material de grande constante dielétrica em que há um compromisso entre a suceptibilidade a ruídos do ambiente, quando resistores de resisitência muito alta são usados, e geração de calor, quando os resistores são de menor valor.

2.4.2 Medição da Corrente

Parte integrante do elemento medidor de energia, o sensor de corrente pode ser, como componente interno do medidor, do tipo resistor *shunt*, transformador de corrente ou sensor de efeito hall. Para a medição de correntes em baixa tensão, os três tipos de sensores podem ser diretamente utilizados. Para a medição de corrente em média tensão é necessário adequar-se os níveis de potencial e de corrente a níveis adequados aos equipamentos de amostragem. Esta é a funcionalidade do Transformador de corrente eletromagnético (TC), dispositivo dotado de núcleo eletromagnético, com enrolamento primário de poucas espiras e fio de grande seção, fornecendo em seu enrolamento secundário corrente proporcional a primária, porém, isolada galvânicamente.

Medição de Correntes em Médias Tensões

A medição de corrente em médias tensões segue o mesmo princípio da medição em baixas tensões. Porém existe a necessidade de se manter isolação elétrica entre dispositivo de medição e condutor em média tensão dependendo de sua referência de tensão.

2.4.3 Medição de Potência em Médias Tensões

Convencionalmente a medição de potência é feita por medidor de energia de baixa tensão acoplado por TP's e TC's. Em alguns casos usa-se apenas os TC's e o medidor de energia é instalado após o transformador da unidade consumidora. Neste caso algum tipo de mecanismo de compensação de perdas do transformador é usado no faturamento(de Medeiros Filho, 1983).

O sistema deve medir tensão e corrente no mesmo instante de tempo, sendo necessárias mais de 16 amostras por ciclo de rede com conversores analógico-digital de 12 bits significativos (4096 níveis) e um circuito periférico que permita a medição com precisão de 0,5% da leitura, segundo ANEEL (2001).

2.4.4 Infraestrutura necessária

A medição de energia em sistemas de média tensão convencional requer de um medidor de energia adequado ao número n de fases do alimentador e, como este medidor opera em níveis de baixa tensão, também do uso de um certo número de TC's e TP's, sendo n-*1* o mínimo necessário e n o adequado para serem disponibilizados todas as informações da rede.

Capítulo 3

Metodologia

Visto que já existem sistemas de medição de energia para média tensão, o dispositivo proposto precisa superá-los em quesitos chave como preço, peso, facilidade de instalação e uso. A metodologia adotada pelos dispositivos existentes é exatamente a mesma da adotada em cabines de medição: uso de TC's e TP's como transdutores para um medidor de energia convencional de baixa tensão, como o da Figura 3.1. Esta imagem mostra um medidor instalado na entrada de um ramal de certa comunidade no Rio de Janeiro para análise de perdas e verificação de necessidade de instalação de medição exteriorizada para baixa tensão. Sua instalação requisitou de uma equipe cinco pessoas por cerca de três horas, pois foi necessária a adequação do poste (cruzeta, condutores e aterramento) ao novo medidor.

Figura 3.1: Instalação de medidor de energia para média tensão com auxílio de caminhão Munck (Fonte: Foto do autor)

3.1 Requisitos

Os requisitos para novo sistema de medição de energia proposto:

- Medição de energia com precisão adequada ao faturamento para tensões entre 2 kV e 34,5 kV e correntes até 400 A em redes aéreas;
- Capacidade de medição de energias ativa, reativa e demandas ativa e reativa e fator de potência;
- Certa capacidade de memória para armazenar dados de cerca de 35 dias, ou seja, pelo período de faturamento, prática prevista em norma e comum em sistemas alimentados por média tensão;
- Facilidade de instalação, sem necessidade de equipamentos especiais ou desligamento

da rede;

- Adequação à maioria dos tipos de conexão entre concessionária e unidade consumidora;

- Custo adequado ao contexto nacional;

- Fabricação nacional.

3.2 Topologia escolhida

Por haver uma grande diversidade nos tipos de conexão entre concessionária e unidades consumidoras, o dispositivo de medição de energia aplicável a redes aéreas deve ter grande flexibilidade em suas características físicas de instalação, sem que isso signifique fragilidade nos quesitos isolamento elétrico do sistema ou segurança de operadores e usuários. O dispositivo não pode ser pivô de qualquer tipo de acidente ou desligamento do sistema.

Os dispositivos devem ser calibrados em ambiente controlado, preferencialmente no local de fabricação, e ter suas medidas independentes das aleatoriedades do local instalação, o que exclui metodologias de sensoreamento de tensão por inferência através de sensor de campo elétrico.

A topologia para o sistema de medição de energia que atende aos requisitos listados é a de medidores monofásicos leves com sensor de tensão e corrente internos, comunicando-se entre si através de rádio-frequência, tendo, portanto um sistema microcontrolado para comunicação e contabilização das variáveis medidas. O sensor deverá ter contato elétrico em uma fase e em um ponto de referência, mantendo isolação elétrica entre estes dois pontos.

Para circuitos monofásicos a dois fios, apenas um sensor conectado entre fase e neutro ou fase e fase é suficiente para medição faturável de energia. Para sistemas trifásicos a 3 fios, pode se usar dois sensores conectados cada um a uma fase e referenciados à terceira

fase (Figura 3.2-B), em conformidade com o *teorema de Blondel*. Para circuitos trifásicos a 4 fios, o ideal é o uso de 3 sensores referenciados ao neutro, para que se possa medir até mesmo grandezas referentes à qualidade de energia (Figura 3.2-A).

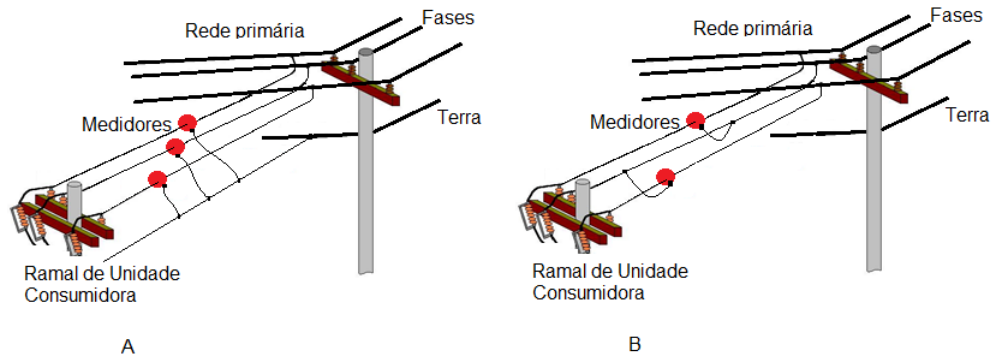



Figura 3.2: Topologias em redes primárias trifásicas (Fonte: Elaboração própria)

3.3 Sensor de Tensão

3.3.1 Testes iniciais

Testes iniciais mostraram a inviabilidade do uso de sensores eletrostáticos capacitivos para medição do campo elétrico, pois há variação da fase do sinal medido pela proximidade entre as fases adjacentes. A Figura 3.3 mostra a topologia testada e a Figura 3.4 mostra um resultado em simulação por *software* dos sinais que seriam medidos em uma rede de 13,8 kV.

O sensor consistia de duas pequenas chapas de cobre de aproximadamente 3 cm^2, sendo cada uma alocada próxima ao condutor, porém com pequena diferença de afastamento deste. As medidas dos três sensores foram feitas com amplificadores diferenciais ligados a conversores analógico-digitais de microcontroladores. Notou-se a possibilidade de medição da tensão com os devidos ajustes para compensar a ação das fases adjacentes. Estes

ajustes, contudo devem ser feitos em campo, pois existe a dependência da geometria do lugar de aplicação, e este processo de calibração em campo não permite exatidão de medida suficiente para faturamento.

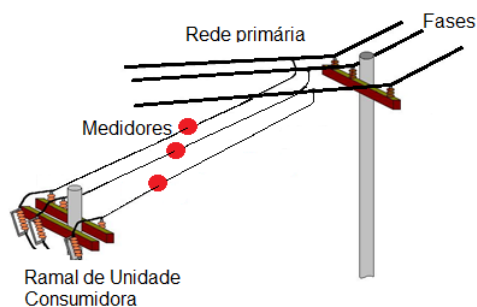



Figura 3.3: Topologia de instalação com sensores de tensão eletrostáticos capacitivos (Fonte: Elaboração própria)

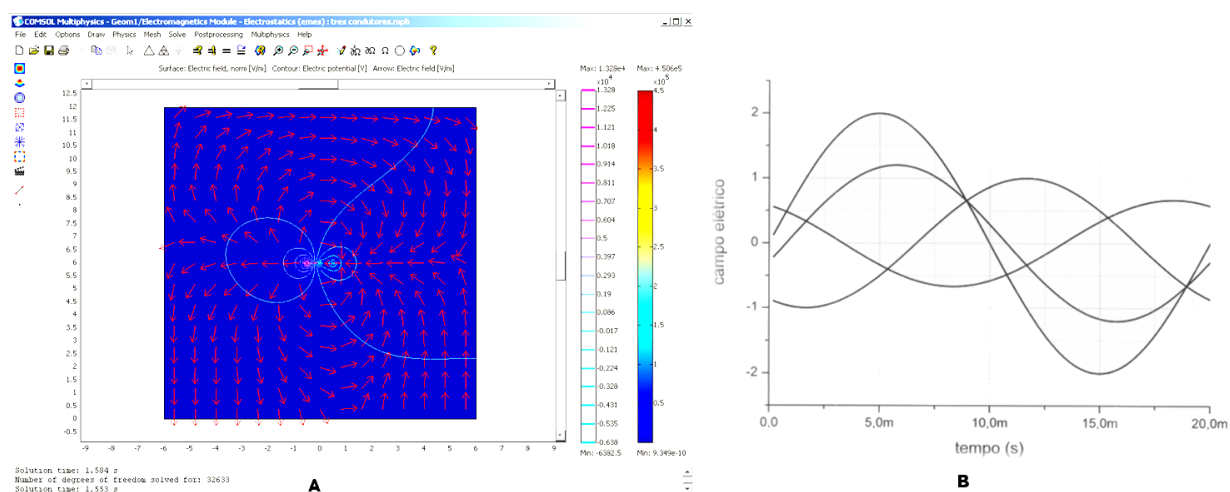



Figura 3.4: Simulação de sensores de tensão eletrostáticos capacitivos: A - Campo elétrico no entorno dos fios da rede; B - Formas de onda adquiridas por três sensores de campo elétrico colocados exatamente sobre os três fios (Fonte: Elaboração própria)

Apesar de não possibilitarem medição de energia faturável, pela necessidade de calibra-

ção em campo, os dispositivos medidores de energia em médias tensões utilizando sensores de campo elétrico para inferência da medida de tensão podem ser aplicados para alguns tipos de caracterização de rede em média tensão (Zambenedetti et al. (2010), Santana et al. (2011) e Bianchin et al. (2011)). Como exemplo, pode-se fazer a análise comparativa de consumo de energia. O erro proveniente do sensor de campo elétrico e os ajustes necessários para compensá-lo devem ser feitos no local de aplicação, o que não permite medição faturável de energia, pois este sistema apresenta erro aproximado de 10%, mesmo depois de calibrado. Como produto destes testes foi gerada a Patente de Invenção PI0700186 - "Sistema detector de desvio de energia elétrica para instalações de consumidores em média tensão"(Pereira et al., 2008).

3.3.2 Transdutor Aplicado

Divisores de potencial resistivos mostram se os mais adequados ao contexto, principalmente por seu peso reduzido. Dentre inúmeros fornecedores de resistores para aplicação em médias tensões destacam-se atualmente as empresas *Caddock*, *Microm* e *Vishay*. As três empresas podem fornecer resistores não indutivos de diversas magnitudes de resistência para médias tensões. Porém, os resistores fabricados pela Caddock possuem em uma de suas extremidades tecnologia que evita faiscamentos entre condutor e resistor, podendo ser fornecidos sob demanda para atender requisitos específicos.

O divisor resistivo para sensoreamento de tensão é composto por três resistores, sendo dois de 200 MOhm e um de 4 kOhm, no qual é feita a amostragem do sinal, conforme a Figura 3.5. O motivo do uso dos dois resistores de 200 MOhm foi aumentar a distância entre as extremidades do divisor resistivo. Seus valores foram calculados de forma a produzir baixa dissipação de calor por efeito joule, pois os resistores serão envoltos por material de grande resistividade, que, em geral, é inversamente proporcional a capacidade de dissipação de calor.

Para a demanda específica deste protótipo, a Caddock fabricou os resistores modelos

MD2522A (200 MOhm) e MD2522B (4 kOhm), fornecendo-os em conjuntos de três resistores devidamente calibrados de modo a haver relação 100000:1 para o divisor resistivo com tolerância de ±1%.

Com o auxílio de um multímetro de grande precisão, o ruído sobre os resistores foi monitorado por 12 horas, sendo que o maior nível detectado chegou a 680 uV, valor compatível com os níveis de tensão para os quais o divisor foi calculado, aproximadamente 137 mV para 13,8 kV ou 345 mV para redes de 34,5 kV.

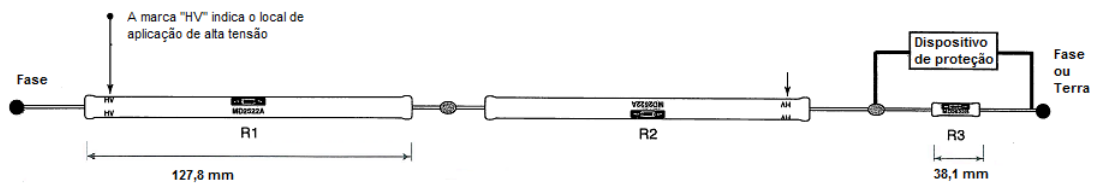



Figura 3.5: Divisor resistivo usado no protótipo (Fonte: Manual do dispositivo criado pela Caddock para este projeto)

3.4 Sensor de Corrente

Para se reduzir a complexidade mecânica do uso de um núcleo magnético fechado, a solução adotada para a medição de corrente foi o uso de transdutor de corrente através de núcleo magnético aberto em torno do condutor pelo qual é fornecida energia à unidade consumidora. Núcleos fechados precisariam ser abertos no momento da instalação, significando a existência de pelo menos dois *gaps* no circuito magnético. A precisão do medidor dependeria do dispositivo mecânico adotado, pois uma ligeira variação dos *gaps*, seja em distância ou excentricidade entre as partes, resulta em grande variação da relutância magnética. Com o uso de um núcleo aberto, a relutância é significativamente maior, mas por não haver partes móveis, não há variações durante o processo de instalação.

Para análise qualitativa de transdutores de núcleo aberto e fechado e obtenção de

parâmetros de construção dos novos transdutores de núcleo aberto, foram realizadas simulações magnéticas em *software* de análise por elementos finitos em algumas configurações. A Figura 3.6-A representa a simulação de um núcleo fechado em torno de um condutor percorrido por corrente transversal de 1 A. Observa-se que praticamente todo o campo magnético está confinado no material do núcleo. Na Figura 3.6-B, foi inserido um pequeno *gap* no núcleo, na extremidade mais afastada. Pode ser visto que isso ocasiona grande dispersão no campo magnético, já não confinado no material do núcleo magnético. Na prática, essa dispersão ocasiona variação de corrente na saída do transdutor (McLyman, 1993)(Gerfer et al., 2002). A simulação foi feita com o auxílio da modalidade de elementos finitos do *software* Matlab.

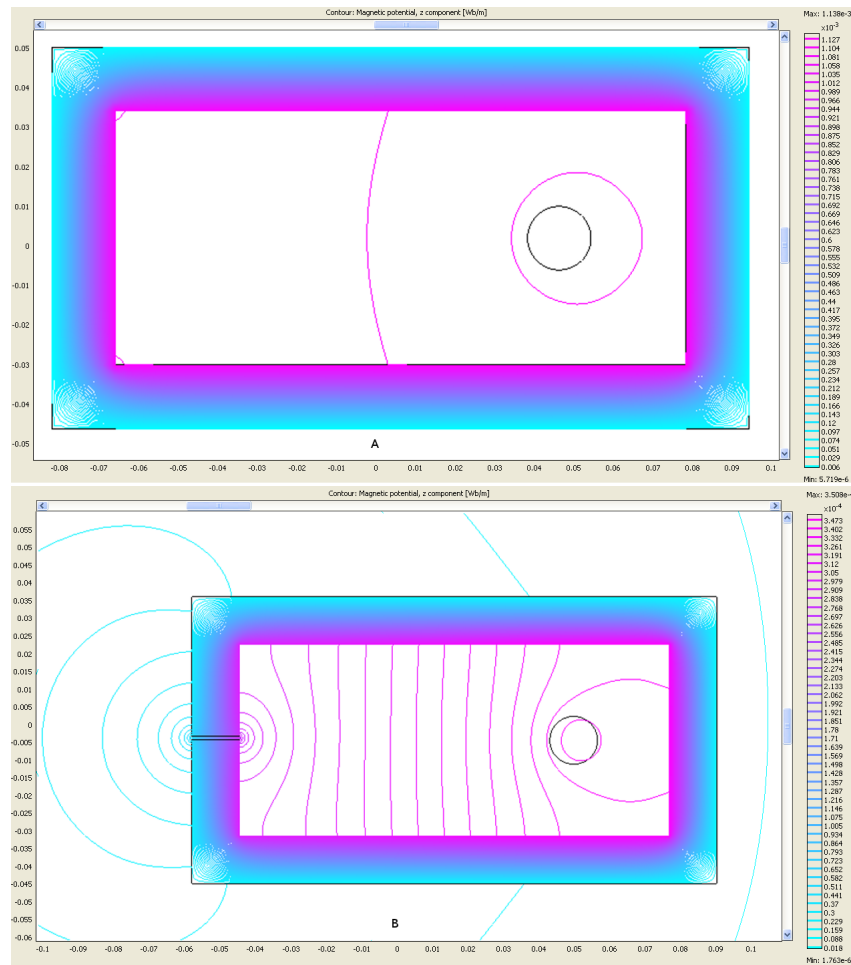



Figura 3.6: Simulação por elementos finitos de núcleos magnéticos fechados pelo *software* Matlab: A-circuito magnético fechado; B-circuito magnético com um *gap* (Fonte: Elaboração própria)

Na Figura 3.7 é mostrada a configuração aplicada e que a dispersão do campo magnético, apesar de ser muito maior, não depende de partes móveis e pode ser considerada constante.

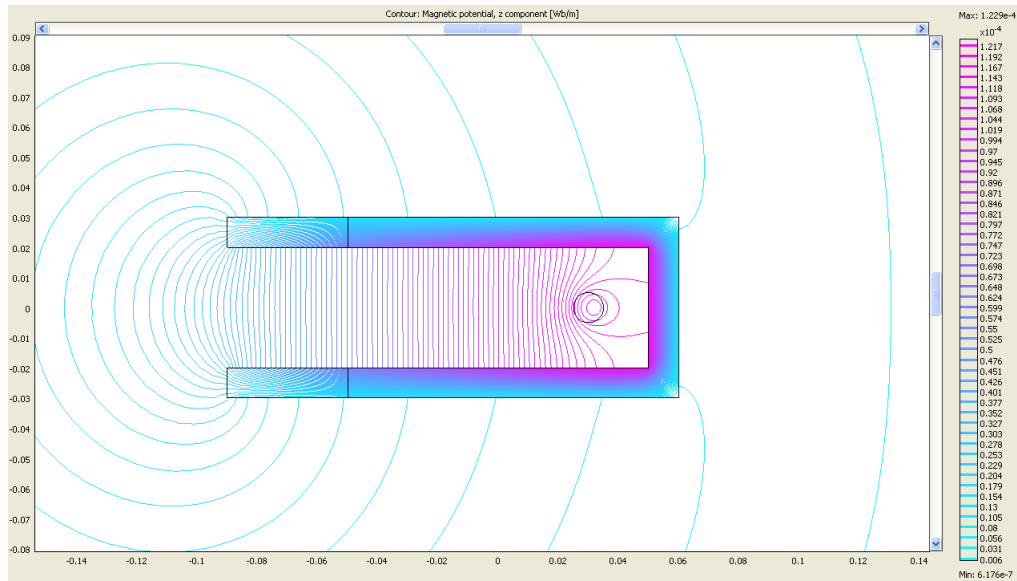



Figura 3.7: Núcleo Magnético Aberto (Fonte: Elaboração própria)

3.4.1 Testes para caracterização do transdutor

Para análise da precisão da medida de corrente em função das diversas variáveis envolvidas, tais como posição e diâmetro do cabo e dimensões do transdutor, foram construídos protótipos de ferro-silício em diversos diâmetros com uma bobina de 1000 espiras de fio de cobre esmaltado dimensionado para correntes de até 200 mA, conforme Figura 3.8-A e com as dimensões mostradas na Tabela 3.4.1. Os núcleos testados são mostrados na Figura 3.8-B.

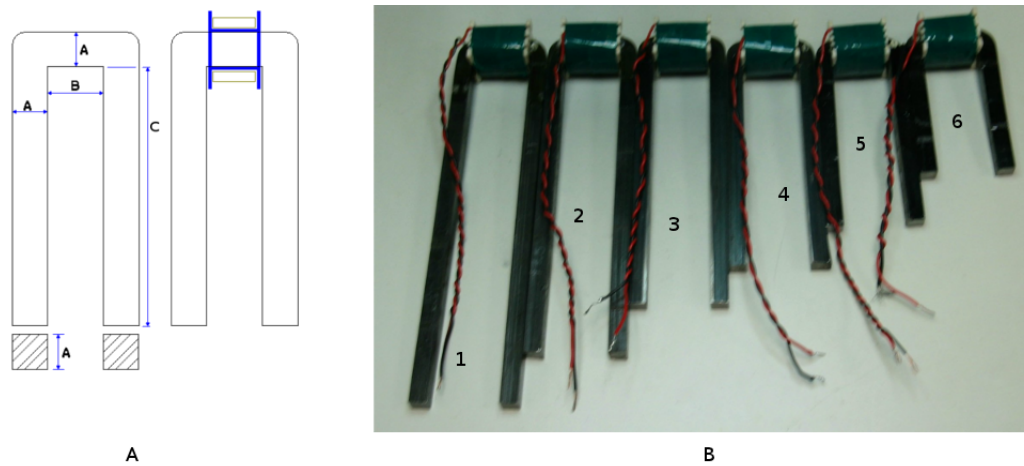



Figura 3.8: Especificação dos núcleos (Fonte: Elaboração própria)

Tabela 3.1: Protótipos de núcleos magnéticos construídos (Fonte: Elaboração própria)

Protótipo	A (cm)	B (cm)	C (cm)
1	0,9	3,0	7,5 cm
2	0,9	3,0	10,0cm
3	0,9	3,0	12,5cm
4	0,9	3,0	15,0cm
5	0,9	3,0	17,5cm
6	0,9	3,0	20,0cm

O procedimento seguido para os testes de medição foi a aplicação de correntes em um condutor passante pelo núcleo e medida da corrente da bobina secundária. Foram aplicadas duas faixas de corrente: de 0 A a 10 A em passos de 1 A e de 10 A a 50 A em passos de 5 A. Além disso, para fins de análise, foi medida a variação do sinal de saída em função da posição do condutor em relação ao núcleo. O aparato construído para permitir essa movimentação é mostrado na Figura 3.9-B. O condutor foi movimentado de 0 a 5 cm em passos de 1 cm.

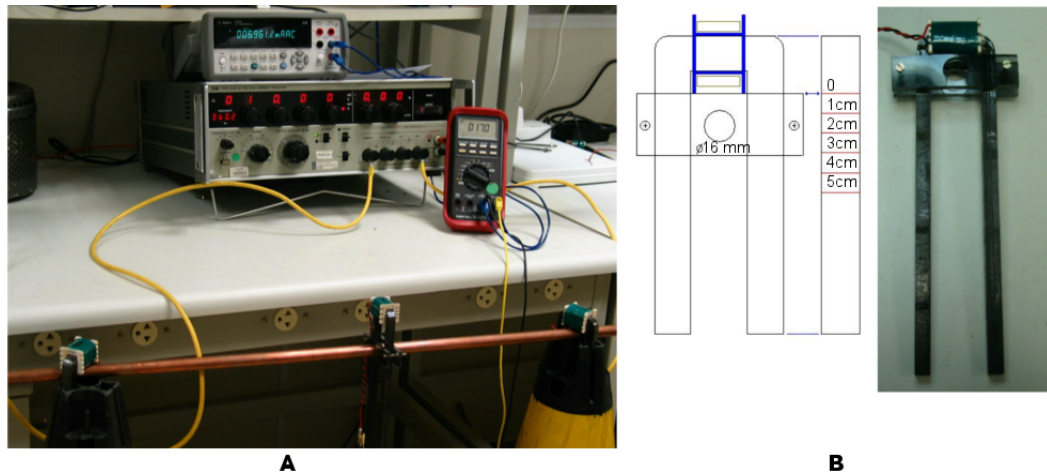



Figura 3.9: Testes dos núcleos: A -Equipamentos (Fonte de corrente e multímetros); B-aparato confeccionado para padronizar os testes (Fonte: Elaboração própria)

Os instrumentos utilizados incluem uma fonte de corrente, multímetros de bancada de grande precisão e multímetro portátil (Figura 3.9-A). Para cada um dos núcleos foram construídas tabelas de medidas de corrente em relação a corrente aplicada e posição do condutor (Apêndice B). A compilação destes dados brutos gerou a Tabela C.1, que mostra que cada transdutor possui determinado coeficiente de linearidade de acordo com sua construção e posicionamento do condutor. Quanto maior o coeficiente, mais eficiente é o acoplamento do campo magnético gerado pela corrente circulante no condutor com a bobina secundária, que no caso ideal seria 1,0. A maior dispersão observada nos núcleos mais curtos resulta em um coeficiente menor que nos núcleos mais longos.

Além disso, observa-se uma grande influência no posicionamento do condutor nas medidas de corrente. Como o equipamento poderá ser aplicado em condutores de diferentes diâmetros, não é possível garantir o correto posicionamento exatamente entre as duas barras laterais do núcleo magnético no processo de instalação. As influências por posicionamento devem ser compensadas. Uma forma de fazê-lo é com inserção de duas bobinas nas barras laterais do núcleo entre o *gap* e condutor. Se o condutor se aproxima de uma

Tabela 3.2: Constantes de Linearidade dos Núcleos (Fonte: Elaboração própria)

Distância (cm)	1	2	3	4	5	6
0,0	0,622	0,685	0,726	0,758	0,722	0,800
1,0	0,560	0,623	0,671	0,711	0,731	0,761
2,0	0,475	0,568	0,617	0,657	0,690	0,724
3,0	0,404	0,493	0,563	0,608	0,645	0,680
4,0	0,330	0,426	0,503	0,560	0,605	0,643
6,0	0,263	0,368	0,447	0,510	0,555	0,602

das barras, se afasta da outra, assim a bobina na barra mais próxima observa-se acréscimo na corrente enquanto que na outra bobina observa-se decréscimo.

Para caracterização da influência na medida de corrente pela aplicação do núcleo em condutores de diferentes diâmetros, foi feito experimento aproximando-se o condutor de uma das barras laterias do núcleo. O teste foi feito também em diferentes diâmetros de condutores. A influência de posicionamento em relação a concentricidade do condutor ou em relação ao diâmetros foi compensada por duas bobinas secundárias colocadas nas barras laterais entre o *gap* e o local aproximado do condutor, conforme a Figura 3.10.

Assim, uma pequena aproximação do condutor de uma das barra laterais aumenta o acoplamento magnético na bobina mais próxima, ao mesmo tempo que diminui da bobina que está se afastando. A soma destas duas correntes pode ser considerado um valor constante.

O mesmo ocorre quando afastamos o condutor da bobina central em direção as bobinas laterais 1 e 2. A corrente decai na bobina central e cresce proporcionalmente nas bobinas laterias, tendo um somatório que pode ser considerado constante. Como resultado, o condutor pode ser fixado em qualquer lugar entre as três bobinas e a medição será feita independente de sua posição.

A Figura 3.10 mostra o transdutor de corrente final e seu esquema de montagem com circuito de compensação. A soma das correntes das bobinas laterias é feita diretamente por uma conexão entre elas. A tensão total gerada pelo transdutor é proporcional a corrente

no condutor.

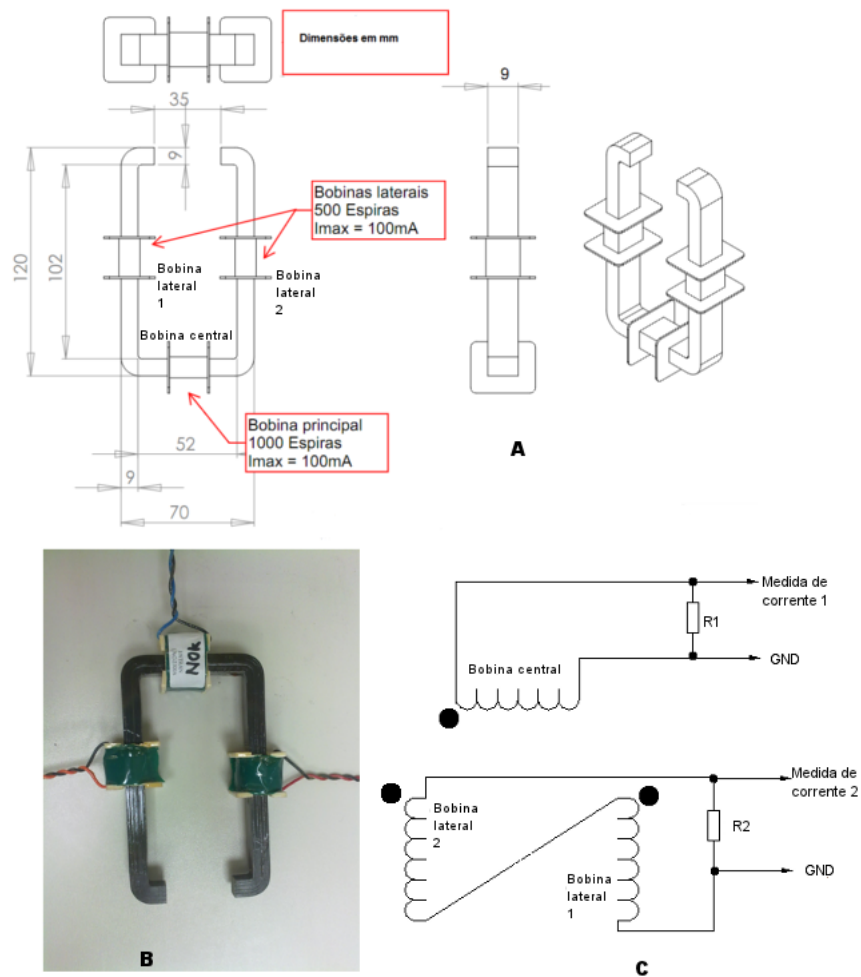



Figura 3.10: Transdutor de corrente final (Fonte: Elaboração própria)

3.5 Sensor de Temperatura

Os sensores de corrente, principalmente do tipo utilizado, podem ter desvios de fase pela variação de temperatura. A medida da temperatura ambiente possibilita pequenos ajustes de defasamento entre tensão e corrente durante os cálculos realizados com o microcontrolador. Este dado também é usado para monitoramento de vida útil da bateria, que tem

desgaste mais acentuado em temperaturas mais altas.

3.6 Alimentação do Medidor

Para a alimentação do medidor foram usadas baterias não recarregáveis modelo ER34615, cujo consumo estimado permite o uso de uma mesma bateria por até 8 meses sem a necessidade de troca. Tal bateria tem capacidade de fornecer 19000 mAh em tensão aproximada de 3,6 V. Justifica-se a escolha por se tratar de um sistema ainda em fase de testes e que será usado para medição diferencial de energia em casos de suspeita de fraude no sistema de medição convencional. Outras opções seriam obter energia através do campo magnético gerado pela corrente circulante ou por pequeno gerador solar ou eólico.

3.7 Sistema Eletrônico de Medição de Energia

Dentre as inúmeras possibilidades existentes no mercado para a medição de energia através dos transdutores de tensão e corrente disponíveis, a escolha foi pelo componente eletrônico MSP430FE427A(TI, 2011b) da empresa *Texas Instruments*. Trata-se de um microcontrolador dotado de um conversor de sinais analógico-digitais do tipo Sigma-Delta de 16 bits de resolução e um módulo integrado de contabilização de energia, evitando que esta tarefas como cálculo de tensão e corrente rms e contabilização de energia precise se feita por *firmware* e programado no processador. A vantagem do uso deste dispositivo é a minimização de circuitos de condicionamento de sinais, pois as entradas analógicas deste aceitam níveis positivos e negativos em relação a sua fonte de alimentação, o que evita erros provenientes de um circuito com amplificadores operacionais para ajuste de níveis de tensão.

A Figura 3.11 mostra o diagrama do circuito desenvolvido com o uso do MSP430FE427A, além de memória de tecnologia ferroelétrica para armazenamento de dados e circuito de comunicação. A Figura 3.12 mostra o circuito de proteção elétrica desenvolvido. Este

segue sugestão do fabricante dos resistores usados no divisor resistivo. Há um centelhador na placa de proteção para garantir que um fusível instalado em série com o divisor resistivo abra o circuito em caso de descargas atmosféricas.

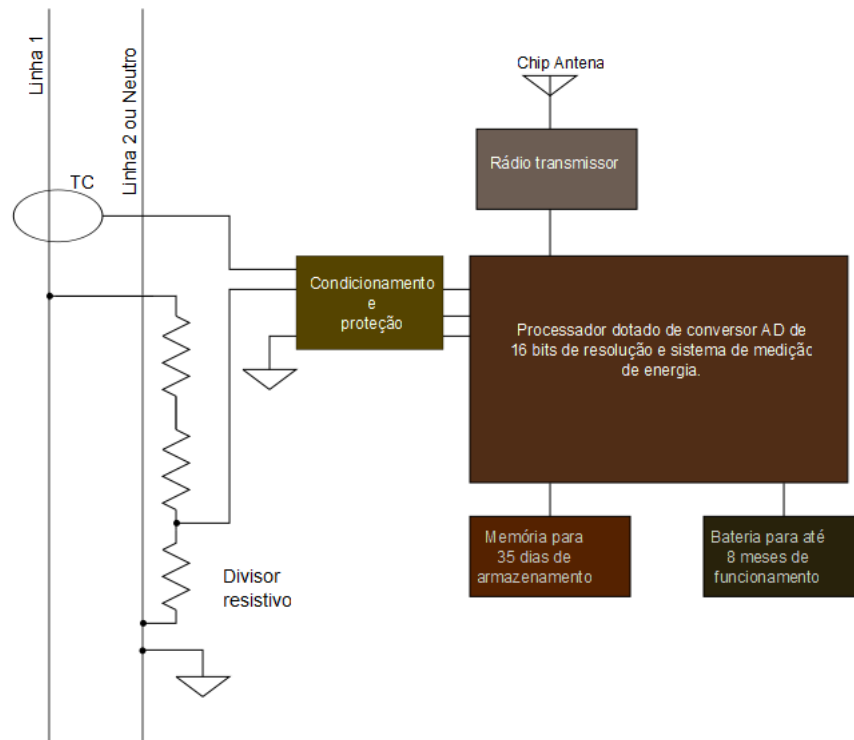



Figura 3.11: Circuito de medição e comunicação desenvolvido (Fonte: Elaboração própria)

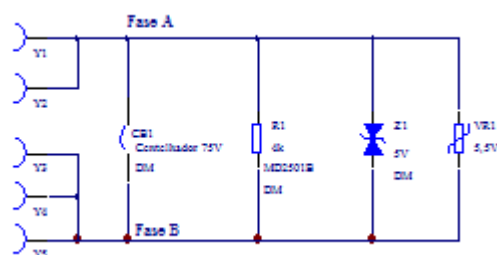



Figura 3.12: Circuito de proteção desenvolvido (Fonte: Elaboração própria)

3.8 Sistema de Comunicação

O sistema de medição depende do envio de seus dados a algum dispositivo, de forma que possam ser usados para faturamento ou detecção de diferenças entre o consumo indicado pelo medidor existente e pelo sistema aqui proposto. Esta interface foi feita via rádio-frequência na banda ISM. Os medidores monofásicos enviam suas informações a um dispositivo requisitante, de tal forma que a energia total do circuito pode ser computada.

O circuito de rádio utilizado foi o CC1101, fornecido pela *Texas Instruments* (TI, 2011a). Este componente eletrônico tem consumo aproximado de 66 mW em transmissão e 50 mw em modo de recepção. É possível desligar seus circuitos analógicos internos através de comando digital. Contudo, quando em modo econômico, o dispositivo não é capaz de receber dados. É necessário ativá-lo e verificar se existe algum outro dispositivo no mesmo canal.

3.9 Funcionamento do sistema

Como existe *hardware* interno ao processador específico para medição de energia, o processador pode ser colocado em um de seus modos econômicos para aumentar o tempo de vida da bateria. O modo de economia escolhido permite que apenas o sistema de medição de energia, a contagem de tempo funcionem. O processador volta a seu estado ativo se detectar que seu sistema de comunicação recebeu algum dado ou se passou um segundo desde que foi colocado em modo econômico. Quando a passagem de um segundo ativa o processador, este lê os dados referentes a contabilização de energia, contabiliza a energia em kWh e guarda na memória ferroelétrica externa dados de consumo se necessário, além de incrementar um segundo em sua contagem de tempo.

O processador também é capaz de ser ativado por um de seus pinos. Como pode ser visto na Figura 3.11, os pinos do componente CC1101 GDO0 e GDO1 estão ligados ao processador e podem fazer esta tarefa. O processador programa o rádio para seu modo

econômico por um tempo aleatório que varia de dois a 12 segundos. Quando este tempo expira, o processador ativa o rádio e envia uma requisição de comunicação e se coloca novamente em modo econômico. Se algum dispositivo está nas proximidades e pretende se comunicar com o medidor, tem 50 ms para responder, pois neste tempo o processador se ativará e desligará o rádio. Se neste interim algum dispositivo responder a requisição, o rádio avisa ao processador por meio do pino GDO0. Este pino é acionado e ativa uma interrupção interna do processador, que lê e interpreta os dados da resposta a requisição. No protocolo desenvolvido, tal reposta vem com o tempo que o medidor deve permanecer em modo ativo para comunicação com o dispositivo de leitura.

O protocolo permite a leitura de dados como energia, tensão, corrente, tempo e dados na memória interna. Também é possível ajustar o relógio interno do processador e fazer a calibração do medidor. Cada medidor tem um número de série que deve ser único e o protocolo é do tipo mestre-escravo, sendo que o medidor apenas responde comandos. Os medidores, além de número de série, tem número de agrupamento. Em um sistema bifásico, por exemplo, em que haverá dois medidores contabilizando energia, o sistema que fará a contabilização usa este número de agrupamento para fazê-lo.

Para a correta comparação dos dados armazenados na memória interna dos medidores desenvolvidos com os dados do medidor convencional, os relógios dos medidores devem ser sincronizados. Isso ocorre todos os dias à meia noite, quando um dos medidores, configurado como mestre do agrupamento, executa processo de sincronismo de relógio com todos os medidores de seu grupo.

Os algoritmos de uso de recusros implementados fazem consumo médio de energia do sensor ser de 9 mW (para alimentação de 3 V o consumo em corrente é de 3 mA). A bateria permite que o sistema funcione ininterruptamente por até 6000 horas.

3.10 Leitura de Dados e Calibração do Medidor

Para a leitura de dados do medidor foi desenvolvido *software* (Figuras 3.14 e 3.15) para microcomputador portátil e um dispositivo de comunicação (Figura 3.13) que, ligado a uma porta USB do computador, pode enviar e receber os dados dos medidores de energia num raio de 50 metros. Alguns testes mostraram que o alcance pode chegar a 200 metros, dependendo de variáveis ambientais e do computador usado.

Figura 3.13: Transceptor (Fonte: Foto do autor)

O *software* pode ler a oscilografia do dispositivo de tensão e corrente ao mesmo tempo (Figura 3.16). A pouca memória do processador limita a oscilografia a um ciclo e meio de tensão e corrente no mesmo instante.

Figura 3.14: Leituras de dados metrológicos do medidor (Fonte: Elaboração própria)

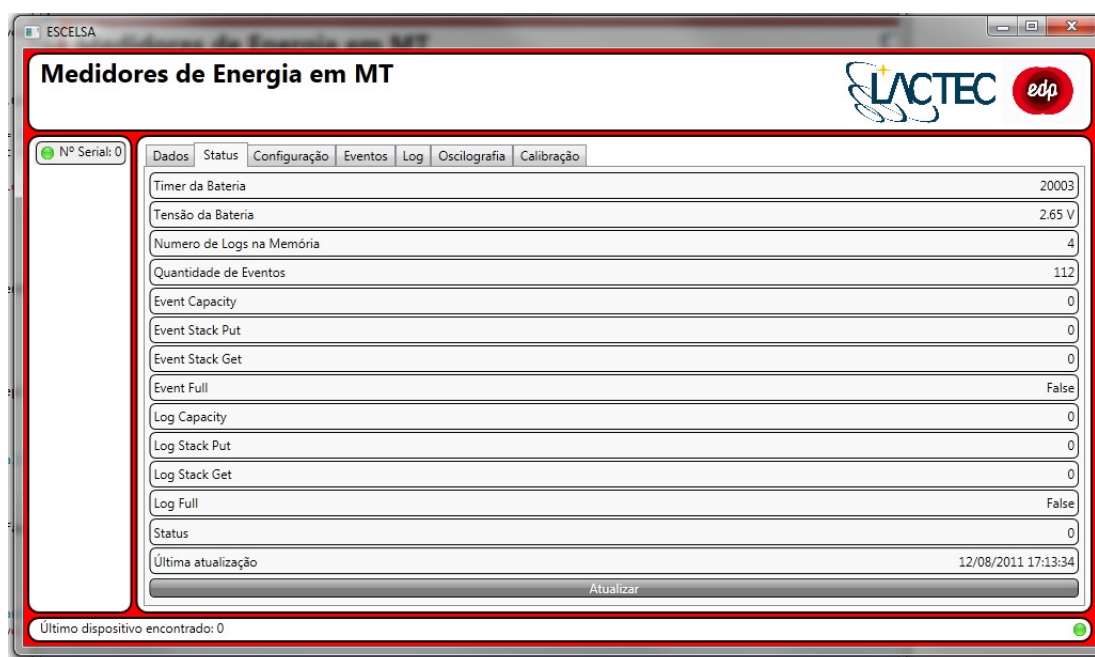



Figura 3.15: Leituras de dados do medidor (Fonte: Elaboração própria)

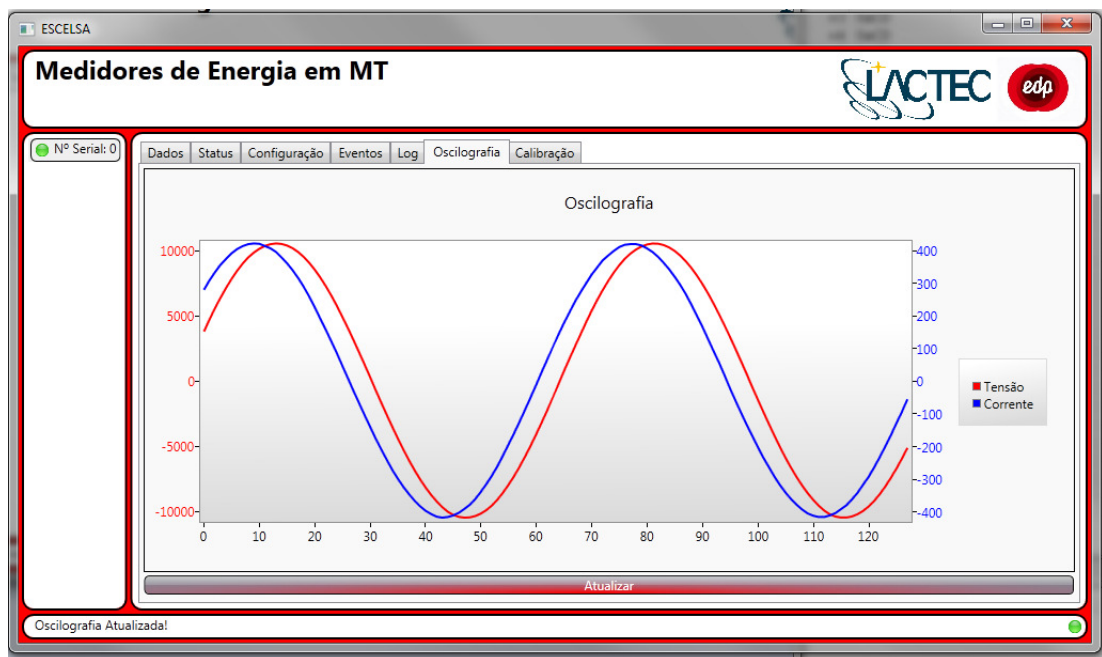



Figura 3.16: Oscilografia do medidor (Fonte: Elaboração própria)

Figura 3.17: Calibração do medidor (Fonte: Elaboração própria)

Além da leitura dos dados metrológicos(Figura 3.14), de memória e oscilografia, o *software* também pode calibrar o medidor(Figura 3.17). O processo de calibração é bastante simples e demora cerca de cinco minutos, sendo necessária fonte de tensão e corrente ajustável em níveis de tensão, corrente e fase. A fonte deve ser estável, pois a medição será feita através dos dados de configuração da fonte.

O primeiro passo é a configuração do medidor com dados como número de série, numero do agrupamento, calibração inicial e ajuste de relógio. Depois, sem a aplicação de tensão ou corrente faz-se a calibração dos desvios de zero por um comando no *software*.

Em seguida aplica-se tensão e corrente conhecidas. O *software* permite que sejam enviados estes valores conhecidos de tensão e corrente ao medidor, que ajusta internamente estes valores.

O próximo passo é a calibração de fase. Aplica-se tensão e corrente conhecidas defasadas 60 graus uma da outra e envia-se o comando de calibração de fase com argumento sendo o cosseno do ângulo. O medidor ajustará internamente o ângulo medido para o ângulo recebido.

Por fim, a calibração de energia é feita com aplicação de potência conhecida. Envia-se o valor da potência e o medidor incia a medição de energia. A contabilização é feita por um minuto. Após este tempo o medidor calcula suas constantes de ajuste para medir exatamente o valor enviado pelo *software*.

3.11 Invólucro

O invólucro foi projetado de forma a dar flexibilidade a qualquer dispositivo que necessite ser instalado em cabos aéreos. Possui uma reentrância para passagem do condutor do qual se deseja a energia. Nesta reentrância há um contato metálico ligado eletricamente com a referência do circuito integrado em seu interior. Possui duas aberturas na parte de baixo para a passagem de fios dos divisores resistivos, visto que neste projeto cada envólucro

possui apenas um divisor resistivo. O resultado pode ser observado na Figura 3.18.

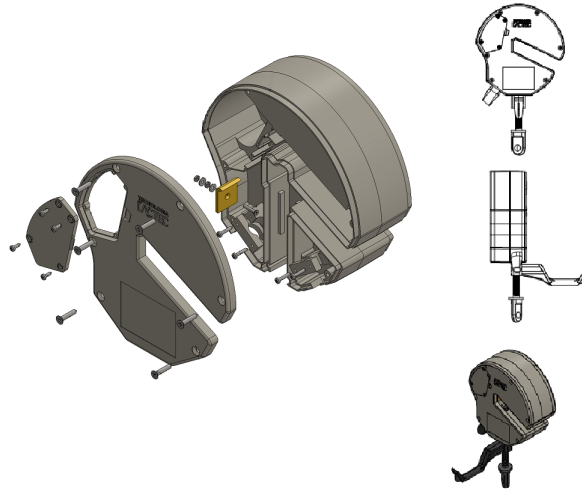



Figura 3.18: Invólucro desenvolvido (Fonte: (Purim et al., 2011))

A instalação com vara de manobra é possibilitada por um apoio na parte de baixo que também é ligada a um dispositivo para fixação do medidor no condutor a ser medido. Depois de apoiar o medidor no condutor, o operador gira a vara de manobra para a sua fixação.

A troca de baterias é feita por uma abertura lateral. Dentro desta abertura há também uma chave para ligar ou desligar a alimentação do circuito integrado. A inovação proporcionada por este invólucro mereceu o Registro de Desenho Industrial DI7004918-1 (Purim et al., 2011).

3.12 Isolador

O divisor resistivo precisa ser encapsulado em material dielétrico. A ideia é de acomodar um fusível de proteção e os dois resistores sobre os quais ficará a maior parte da tensão entre os dois pontos de conexão do divisor dentro de uma estrutura similar a de um isolador.

Portanto, daqui em diante a palavra isolador se refere a esta adaptação e não mais a um isolador propriamente dito.

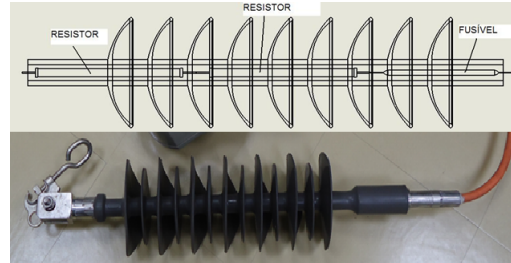



Figura 3.19: Primeira versão do isolador desenvolvida (Fonte: Elaboração própria)

Dentre as principais tecnologias de isolador disponíveis, mostram-se adequadas as tecnologias a fibra de vidro e silicone, pois, além da grande rigidez dielétrica, trazem robustez mecânica ao protótipo. A empresa Balestro, fabricante nacional de para-raios e isoladores, adaptou um de seus isoladores poliméricos com terminal de alumínio de tecnologia fibra de vidro com saias de silicone para receber o divisor resistivo em seu interior. A Figura 3.19 mostra a primeira versão do divisor resistivo encapsulado.

Como haverá dissipação de energia dentro do isolador foi necessário caracterizar a capacidade máxima de dissipação de calor de uma carga interna ao isolador. Para isso, foram inseridos alguns resistores dentro do tubo de fibra de vidro envolto por saias de silicone juntamente com sensores de temperatura. Também foram feitas imagens térmicas do isolador com sistema estável (temperatura interna e do ambiente estáveis). A Figura 3.20 mostra os níveis de temperatura internos do isolador e foi feita com um sensor de temperatura inserido dentro do tubo de fibra de vidro. A Figura 3.21 mostra a temperatura ambiente através de imagem térmica. A temperatura externa foi estabilizada em 25 °C através de aparelho de ar condicionado.

Nota-se que uma carga maior que 3 W aumenta muito a temperatura interna do isolador, sendo o limite prático estabelecido para o projeto.

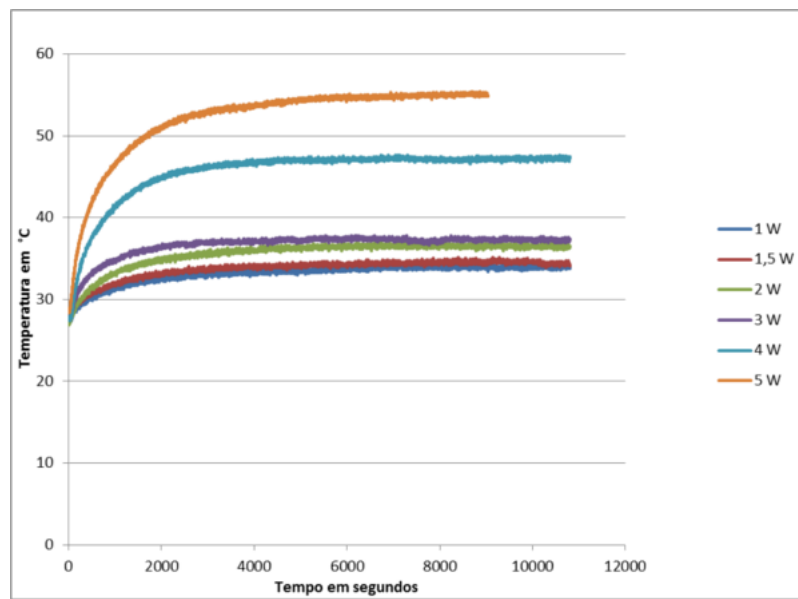



Figura 3.20: Teste de aquecimento devido a dissipação de calor interna (Fonte: Elaboração própria)

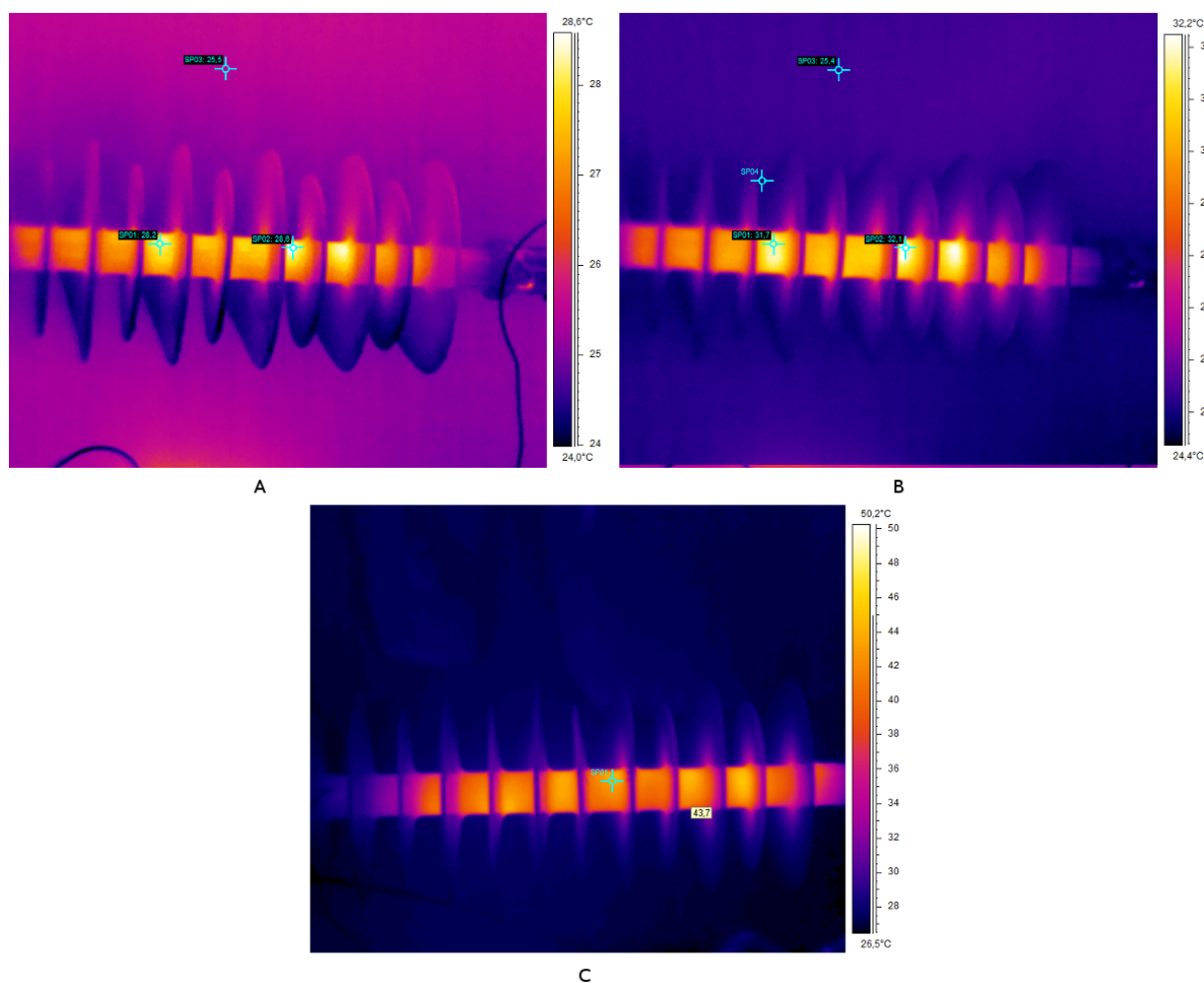



Figura 3.21: Fotos térmicas do isolador com dissipação interna de energia: A - Carga de 2 W; B - Carga de 3 W e C - Carga de 5 W. (Fonte: Elaboração própria)

Apesar de ter passado por todos os testes de suportabilidade dielétrica necessários para equipamentos (isoladores) aplicados a médias tensões até 34,5 kV, este dispositivo apresenta um problema para o projeto. A corrente passante pelo divisor resistivo é da ordem de 34 uA para aplicação em redes de 13,8 kV, assim, a tensão fornecida pelo divisor é de 137 mV. Isto faz com que o medidor de energia seja susceptível a ruídos elétricos provenientes das fases adjacentes. Em médias tensões estas influências não podem ser ignoradas, como

se faz em projetos de medidores de energia para baixas tensões.

Os testes foram feitos em fonte geradora de onda senoidal de até 5000 V de pico com o medidor de energia já montado em seu invólucro e com o isolador conectado. O procedimento de testes foi a aplicação da tensão gerada pela fonte no terminal do isolador e referência da fonte no terminal do invólucro com a leitura da tensão e sua oscilografia através do *software* desenvolvido. Em seguida a tensão gerada foi aplicada ao terminal do invólucro e a referência ao terminal do isolador. Os dados mostraram taxa de variação de 50% no sinal medido e forma de onda distorcida (Figura 3.22).

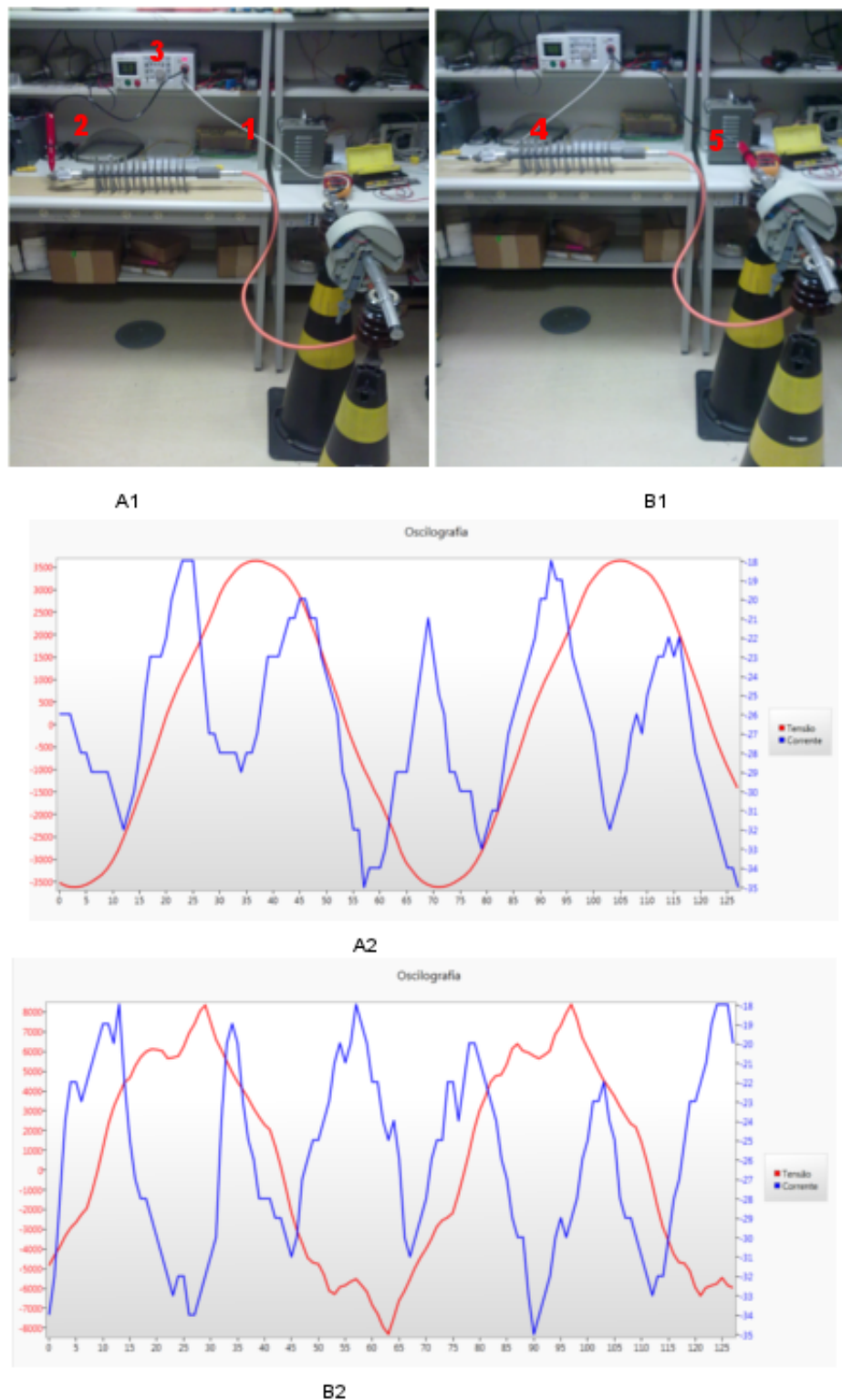



Figura 3.22: Testes da primeira versão do isolador: A1-Medida de tensão no isolador com aplicação de tensão no resistor de maior ordem do divisor (1-Referência da fonte;2-5000 V;3-Fonte de bancada de alta tensão) ; A2-Medida de tensão; B1-Medida de tensão no isolador com aplicação de tensão no resistor de menor ordem do divisor(4-Referência da fonte;5-5000 V) (Fonte: Elaboração própria)

A título de experiência, aumentou-se a tensão secundária do divisor resistivo por meio da alteração do valor do resistor de 4 kOmh para 40 kOhm, 400 kOhm e finalmente 4 MOhm. O resultado mostrou que apenas o aumento da tensão não foi suficiente para redução do erro devido a influência de tensões elétricas do ambiente. Aplicando-se blindagem no resistor de mais baixo ordem do divisor, notou-se que o ruído estava sendo induzido no fusível do isolador. A blindagem experimental da Figura 3.23 reduziu a influência de ruídos do ambiente à medida durante os testes de laboratório com a fonte monofásica de 5000 V.

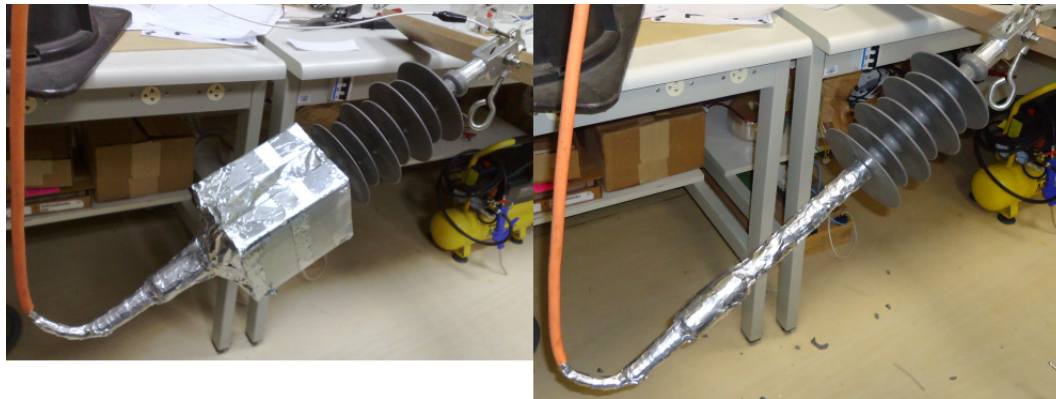



Figura 3.23: Blindagem Experimental, primeiro por cima da aletas e depois, retirando-se as aletas (Fonte: Elaboração própria)

Para resolver este problema foi necessário trocar a posição do fusível de proteção interno ao divisor resistivo para o lado que estará em contato com a fase, blindar contra ruídos elétricos o outro lado do isolador. A alteração feita é mostrada no diagrama da Figura 3.24. Exteriormente não podem ser vistas as modificações entre as duas versões do isolador, porém o diagrama mostra que foi inserida blindagem elétrica cobrindo um dos resistores de maior ordem do divisor resistivo. Além disso, o fusível foi inserido no lado do isolador ligado diretamente ao condutor de alta tensão, deixando de ser ponto de entrada de ruídos.

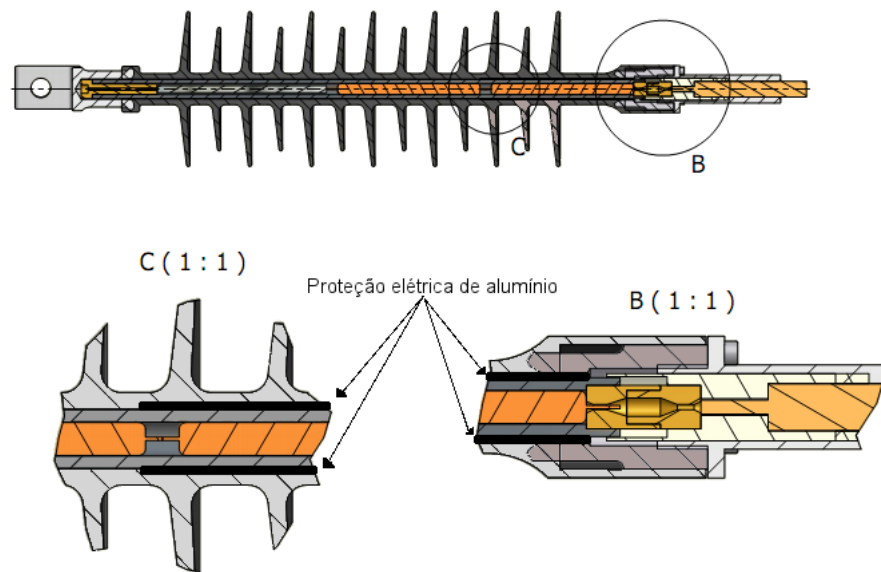



Figura 3.24: Isolador final (Fonte: Projeto do isolador feito pela empresa Balestro)

O cabo utilizado para a conexão entre o isolador e o medidor é fornecido pela empresa IFE e suporta tensões até 35 kVcc (Figura 3.25). Este cabo já é usado em outros equipamento para médias tensões.

Figura 3.25: Cabo de ligação entre isolador e medidor (Fonte: Fotos do autor)

3.13 Testes de funcionalidade

Para testar o funcionamento do dispositivo e linearidade da medida de tensão, foi montada estrutura conforme a Figura 3.26 no laboratório de alta-tensão do LACTEC. A medida de tensão eficaz adquirida pelo software mostrou que o divisor resistivo tem comportamento linear em toda a faixa de operação (2 kV a 34,5 kV). O dispositivo em testes é mostrado na Figura 3.27.

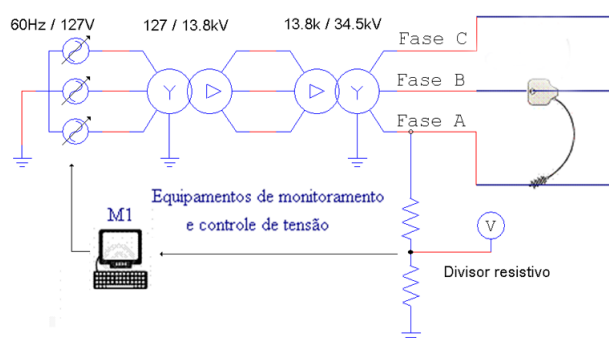



Figura 3.26: Instalação do protótipo (Fonte: Elaboração própria)

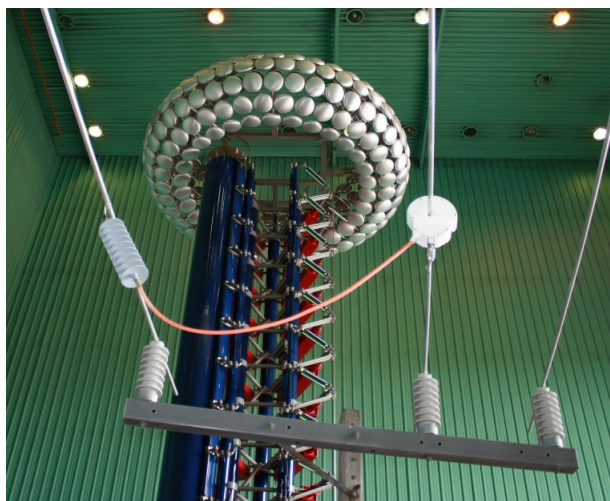



Figura 3.27: Circuito testado no laboratório de alta-tensão do LACTEC (Fonte: Foto do autor)

Capítulo 4

Resultados

4.1 Em laboratório

O medidor foi projetado para uso em redes de 2 kV a 34,5 kV. Foram feitos ensaios de suportabilidade e tensão aplicada para os níveis estabelecidos por norma para redes de até 15 kV, nos quais o medidor com a segunda versão do isolador foi aprovado (apêndice C). A primeira versão do isolador fora aprovada inclusive em ensaios para equipamentos de 34,5 kV.

Para análise precisão de medição de energia utilizou-se uma fonte monofásica de geração de alta tensão até 5 kV e uma fonte de geração de corrente monofásica para até 50 A. Ambas as fontes foram ligadas ao mesmo condutor de modo a simular o consumo de energia ativa e reativa. A fonte de corrente possuia ajuste de fase possibilitando correntes de mesma fase de tensão e correntes defasadas de 60 graus da tensão. O maior erro encontrado foi de 0,9%. O procedimento seguido foi o ajuste da tensão e da corrente para valor conhecido e aquisição do valor da energia em kWh do medidor durante o período de uma hora. Os resultados deste ensaio sao mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Análise de precisão de medição de energia (Calibrado em 5 kV e 10 A) (Fonte: Elaboração própria)

Tensão (kV)	Corrente (A)	Cosphi	Medida 1 (kWh)	Medida 2 (kWh)	Erro
3	5	1,0	14,890	14,893	0,7%
3	5	0,5	7,435	7,435	0,9%
3	20	1,0	59,724	59,720	0,5%
3	20	0,5	29,820	29,828	0,6%
5	5	1,0	24,830	24,910	0,5%
5	5	0,5	12,463	12,490	0,2%
5	20	1,0	99,811	99,31	0,4%
5	20	0,5	50,120	50,009	0,1%

4.2 Em campo

Os medidores de energia foram instalados em rede aérea da concessionária Escelsa em setembro de 2011 para testes iniciais de medição. Naquele momento ainda não se sabia da vulnerabilidade da primeira versão do isolador, com os quais estes medidores foram confeccionados. Os valores medidos foram comparados com os dados do medidor de energia convencional instalado dentro da cabine de medição. Os valores de corrente foram praticamente os mesmos medidos pelo medidor convencional, porém houve erro de 15% em uma das fases e erros de aproximadamente 10% nas demais fases para a medição de tensão. Não foi possível fazer medida comparativa de energia naquele momento.

No entanto, foi demonstrado que o processo de instalação é significativamente mais simples que o de outros dispositivos com mesma funcionalidade. A instalação foi feita com auxílio de vara de manobra por apenas um operador. Nesta primeira operação de instalação utilizou-se um caminhão com cesto isolado para evitar qualquer tipo de acidente, porém demonstrou-se que esta operação poderia ser feita do solo. Os medidores instalados podem ser vistos na Figura 4.1.

Figura 4.1: Circuito de proteção desenvolvido (Fonte: Elaboração própria)

Três meses após a primeira instalação, foram montados três novos medidores com isoladores dotados de blindagem elétrica, conforme a Figura 3.24. Os medidores foram calibrados em laboratório e instalados no mesmo local da instalação anterior. Observou-se erro aproximado de 3% em cada medidor, tomando-se como referência o medidor padrão instalado no cubículo que aparece ao fundo da Figura 4.1. Os erros de medida foram observados principalmente nas grandezas energia e tensões. Como não foram observados tais erros em laboratório, cuja fonte usada era monofásica, a fonte de erro é a proximidade das outras fases do sistema. Com isso mostrou-se que blindar de parte do isolador não é o suficiente para eliminar os ruídos ambientais e fazer do medidor um sistema faturável de energia.

Uma nova abordagem para eliminar estes erros será o aumento da corrente passante pelo divisor resistivo. Para isso foram adquiridos resistores de 40 MOhms, que serão montados no lugar dos resistores de 400 MOhm em isoladores sem blindagem (primeira versão do isolador), porém com o fusível no lado de conexão com a fase. Os testes em campo e em laboratório desta terceira versão dos isoladores seguirão o mesmo procedimento das instalações anteriores.

Capítulo 5

Conclusão

Fraudes em sistemas de medição de energia são vetores de desperdício de um importante recurso, a energia elétrica. Em baixas tensões a medição exteriorizada tem sido muito usada como alternativa de um sistema de medição mais robusto. Este trabalho apresentou um equipamento capaz de suprir a mesma demanda para unidades consumidoras em médias tensões.

O protótipo desenvolvido traz um novo paradigma para a medição de energia em médias tensões, com equipamentos desenvolvidos especificamente para este uso. A redução de peso, a flexibilidade e a facilidade de instalação proporcionadas pelo novo medidor fazem do equipamento uma ótima ferramenta para análise de perdas não técnicas. Não é necessário desligar o ramal da unidade consumidora, não há alarde de instalação do novo equipamento e possíveis fraudes podem ser detectadas pela comparação entre este medidor e o medidor convencional presente.

Com exceção dos resistores usados no divisor resistivo e dos circuitos integrados, todas as demais peças do equipamento são de fabricação nacional. Os circuitos eletrônicos não têm similares no mercado nacional.

O dispositivo possui poucas partes móveis, sendo que esta movimentação não tem influência significativa na medição. O sensor de corrente possui compensação de diâmetro

do condutor e também pode compensar pequenas variações de posicionamento que ocorrem durante a instalação. O isolador desenvolvido mostrou-se adequado e seguro para uso e sua precisão permite, juntamente com o transdutor de corrente desenvolvido, a medição de energia com exatidão suficiente verificação de fraude no sistema convencional de medição.

O projeto ainda carece de testes em campo com novas versões de isoladores que tem-se trabalhado para sanar a problemas de precisão nas medidas de tensão (Tópico 4.2), e serão feitos com o auxílio da concessionária Escelsa e terão seus resultados divulgados em artigo sobre o projeto.

5.1 Limitações

As limitações de precisão verificadas em testes em campo mostram que será necessário projetar isoladores com divisores resistivos de tensão específicos para os níveis de tensão de aplicação. Correntes muito baixas no divisor resistivo inviabilizam a medição com precisão e a limitação de dissipação de calor dos materiais do isolador limita a potência a ser dissipada pelo divisor resistivo a 3 W. Isso significa que haverá um modelo de medidor para 15 kV e outro modelo para 34 kV, sendo a única diferença os valores do divisor resistivo.

Ensaios de suportabilidade indicaram que o medidor pode ser aplicado de forma segura em redes de até 15 kV, porém são necessários mais testes para aplicação em sistemas de 35 kV.

Apesar do sistema de leitura via rádio ter sido especificado e construído para ser efetivo em distâncias de no mínimo 50 metros, ao serem instalados em condutores energizados, os medidores tem seu limite de distância para leitura reduzidos de maneira imprevisível, chegando, em alguns casos, a menos de 5 metros.

A alimentado do dispositivo é feita por bateria não recarregável, portanto sua manutenção periódica é necessária.

5.2 Trabalhos Futuros

O medidor desenvolvido é funcional para a aplicação de detecção de fraudes no sistemas de medição convencional, contudo, não pode ser aplicado como medidor de faturamento. A bateria possibilita uso ininterrupto por até 8 meses, porém ao fim deste tempo é necessário que o aparelho seja retirado para sua troca. Assim, a alimentação do circuito por energia solar, eólica, indução ou outra qualquer possibilitaria seu uso como o único dispositivo de medição de energia da unidade consumidora.

A integração deste dispositivo com a infraestrutura da concessionaria através de leitura remota elimina a necessidade de um operador ir até o local de aplicação para coleta dos dados, e seria a metodologia ideal para a interação entre equipamento e concessionária. A integração com os futuros sistemas inteligentes poderá ser feito no futuro utilizando este canal de comunicação.

Outro trabalho futuro interessante seria um estudo mais detalhado das variações que ocorrem em sensores de campo elétrico e viabilizá-los como transdutores de tensão para medição de energia. O novo medidor de energia proposto pelo presente trabalho será uma ferramenta para este estudo. pois fornece as medidas e oscilografia para comparação. O sensor de campo elétrico poderia ser inserido no mesmo envólucro, permitindo análise e comparação em tempo real.

Referências Bibliográficas

Alexander, R. (1992). *Handbook for Electricity Metering.* Washington, DC: Edison Electric Institute, 9 edition.

ANEEL (2000). Resolução 456. Resolução.

ANEEL (2001). Resolução 505. Resolução.

ANEEL (2003). Resolução 258. Resolução.

ANEEL (2011). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional. PRODIST.

Bianchin, C. G., Demonti, R., de Resende, G. P., and Loddi, T. (2011). Desenvolvimento de um controlador automático para bancos capacitivos otimizados para sistemas de distribuição. In *VI Citenel*, Fortaleza.

de Medeiros Filho, S. (1983). *Medição de Energia Elétrica.* Guanabara Dois.

Filho, V. S. (1996). Desenvolvimento de um sensor de campo elétrico alternado com transmissão por fibra-Óptica. Master's thesis, Universidade Federal do Paraná-Setor de Ciências Exatas-Curso de Pós-Graduação em Física.

Gerfer, A., Zenker, H., and Rall, B. (2002). *Trilogy of Inductors.* Würth Elektronik GmbH.

Hage, F. S. E., Ferraz, L. P. C., and Delgado, M. A. P. (2011). *A Estrutura Tarifária de Energia Elétrica - teora e aplicação.* Synergia.

Lucas, J. R. (2001). *High Voltage Engineering*. Open University of Moratuwa, Katubedda, Sri Lanka.

McLyman, C. W. T. (1993). *Designing Magnetic Components for High Frequency dc-dc Converters*. Kg Magnetics, Inc.

Pereira, J. A., de Resende, G. P., Wolaniuk, G. B., and Chueiri, I. J. (2008). Sistema detector de desvio de energia elétrica para instalações de consumidores em média tensão. Patente PI0700186-0 A2- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC (BR/PR).

Purim, C. A., Scremim, R. D., Wolaniuk, G. B., de Resende, G. P., Mognon, V. R., and Zambenedetti, V. C. (2011). Configuração aplicada em sensor de engate para média tensão. Registro de Desenho Industrial -Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC (BR/PR).

Santana, F. J. R., Zambenedetti, V. C., Resende, G. P., Mognon, V. R., and Wagner, R. (2011). Desenvolvimento de sensores inteligentes para detecção de faltas em linhas aéreas com comunicação via plc (power line communications). In *VI Citenel*, Fortaleza.

Sen, P. C. (1996). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley and Sons, 2 edition.

TI (2011a). Cc1101.

TI (2011b). Msp430fe427a.

Zambenedetti, V. C., Santana, F. J. R., Almeida, L. A. L., de Resende, G. P., Mognon, V. R., and Wagner, R. (2010). Sensores inteligentes para detecção de faltas em linhas aéreas de distribuição da coelba. In *Sendi*, São Paulo.

Apêndice A

Questionário enviado a fabricantes de transformadores

O questionário abaixo foi enviado aos principais fornecedores de transformadores para unidades consumidoras alimentadas por médias tensões para melhor conhecimento do contexto nacional envolvido. Na sequência são apresentadas as repostas.

A.1 Questionário

Tenho algumas dúvidas sobre transformadores de média tensão (entre 2 e 35,4 kV) usados em subestações de consumidores que compram energia da concessionária em média tensão. Usarei as informações como referência dissertação de mestrado sobre medição de energia de consumidores alimentados em média tensão.

- 1 – Quais as normas referentes a este tipo de transformador?
- 2 – Qual o número de fases e fios no primário e secundário dos transformadores para este fim? (Ex. Alguém compra transformadores bifásicos?)
- 3 – Quais os tipos de ligação no primário e secundário destes transformadores?

- 4 – Como os clientes ligam os transformadores? Alguém ainda utiliza a conexão SCOTT com transformadores monofásicos? Existe alguma conexão diferente de delta ou estrela que vocês forneçam?

- 5 - Vocês tem alguma bibliografia para recomendar sobre o assunto?

A.2 Resposta da Romagnole

- Resposta 1 – NBR 5440 e NBR 5356

- Resposta 2 – Normalmente os consumidores que compram energia em média tensão são as indústrias e grandes estabelecimentos comerciais. Este clientes normalmente compram somente transformadores trifásicos 15 kV com 3 buchas no primário e 4 buchas no secundário. No PR, há o caso das linhas de 34,5 kV que os transformadores podem ter 3 ou 4 buchas no primário dependendo da potência (ver NTC's da Copel).

- Resposta 3 – Normalmente são delta no primário e estrela com neutro acessível no secundário. Os transformadores da COPEL em 34,5 kV são com primário em estrela aterrada até 1000 kVA. Acima de 1000 kVA são estrela com neutro acessível. O secundário em ambos os casos são estrela com neutro acessível.

- Resposta 4 – Conforme as normas de fornecimento de energia em média tensão das concessionárias (Exemplo NTC Copel). Não temos informações se alguém ainda utiliza a conexão Scott. Existe a conexão zig-zag porém é muito raro ser utilizada.

- Resposta 5 - As normas NBR 5440, 5356, ANSI C57.12.00 e ANSI C57.12.20, IEC série 60076. Tem também o livro citado abaixo: A. S. Stigant and J. S. C. Franklin (1983). The J&P transformer book. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.

A.3 Resposta da Blutrafo

- Resposta 1 – NBR10295 (pra trafos a seco) e NBR5440 e NBR5356 (pra trafos a óleo)
- Resposta 2 – Normalmente é trifásico É raro bifásico ou monofásico em média tensão . Então no primário temos 3 terminais (ligação delta) e secundário 4 terminais (ligação estrela). Isto falando de trafos trifásicos.
- Resposta 3 – Para trifásicos, normalmente, é delta/estrela.
- Resposta 4 – Ligação scott é raríssimo. Além de delta/estrela tem casos de pedirem ligação zig-zag.
- Resposta 5 – Além das normas, existem livros que falam sobre transformadores. Os que tenho aqui não são mais publicados. Mas consulte na internet.

A.4 Resposta da WEG

- Resposta 1 – Basicamente seguimos as normas ABNT (NBT 5356, 5440, 5380, 10295 e 12454), porém, normalmente cada concessionária distribuidora de energia possui padrões próprios, e felizmente estes requisitos já estão disponíveis nos sites das concessionárias.
- Resposta 2 – Praticamente só se utilizam transformadores trifásicos, os monofásicos e/ou bifásicos são restritos a instalações rurais com medição na BT.
- Resposta 3 – O tipo de ligação varia de acordo com o padrão de cada concessionária, mas basicamente delta na AT e estrela com neutro aterrado na BT, grupo de ligação Dyn1, alguma variação existe nas conexões em 34,5 kV, a Copel por exemplo solicita AT estrela com neutro/BT estrela com neutro/terciário para harmônicas em delta YNyn0d1

- Resposta 4 – Novamente, o padrão do grupo de ligação é definido pelas concessionárias. Ligação Scott é uma forma bem particular de conexão de cargas monofásicas de médias e grandes correntes (máquinas de solda, por exemplo) e normalmente solicitadas por empresas que utilizam transformadores específicos para estas cargas. Além das ligações já citadas, existe o enrolamento em zig-zag que é utilizado em transformadores (ou reatores) de aterramento.

- Resposta 5 – Além das normas ABNT que descrevem sobre transformadores, recomendamos acessar aos sites das concessionárias.

Apêndice B

Testes de transdutor de corrente

B.1 Linearidade de diferentes tamanhos de núcleo

Os núcleos testados foram montados somente com a bobina central (3.4.1). Observa-se variação da medida proporcional ao posicionamento do condutor pelo qual passa a corrente a ser aferida.

Transdutor A, Distancia fixa = 13mm						
Diâmetro do cabo	Coeficiente linear					
	H = 7,5 cm	H = 10 cm	H = 12,5 cm	H = 15 cm	H = 17,5 cm	H = 20 cm
5,36	0,5283	0,5959	0,6443	0,6800	0,7217	0,7466
10,61	0,4914	0,5758	0,6348	0,6602	0,6952	0,7326
15,36	0,4802	0,5769	0,6110	0,6517	0,7029	0,7274
18,66	0,4643	0,5513	0,6020	0,6560	0,7000	0,7223
20,05	0,46	0,54	0,60	0,64	0,69	0,72

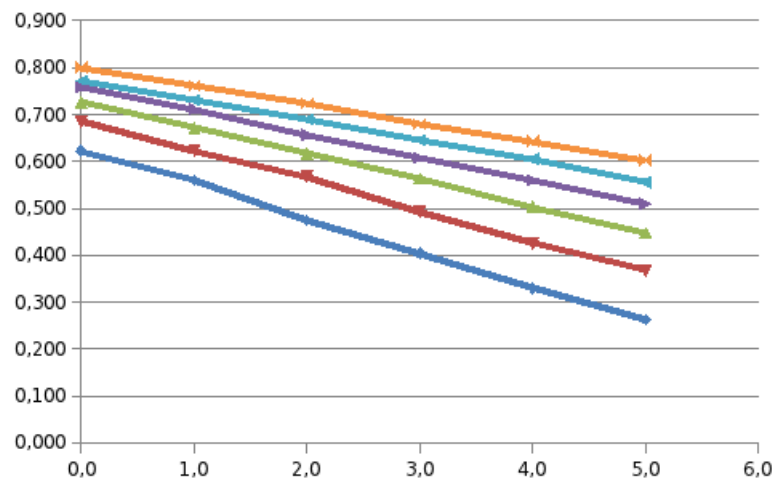



Figura B.1: Linearidade de medida de corrente em relação ao posicionamento do condutor

B.2 Testes do núcleo final com bobinas de compensação

As bobinas laterias podem diminuir a interferência do diâmetro e posicionamento do condutor na medida de corrente.

		Bobina Principal	Bobina lateral série	Imagem
	distância	Tensão de saída	Tensão de saída	
Corrente 10 A	40	55,17 mV	48,12 mV	1
	50	59,00 mV	44,9 mV	5
	60	62,77 mV	41,19 mV	9
	70	65,92 mV	37,00 mV	13
	80	69,4 mV	31,77 mV	

		Bobina Principal	Bobina lateral série	
	distância	Tensão de saída	Tensão de saída	
Corrente 20 A	40	110,1 mV	96,15 mV	2
	50	117,95 mV	89,77 mV	6
	60	125,5 mV	82,34 mV	10
	70	131,89 mV	73,95 mV	14
	80	138,7 mV	63,56 mV	18

		Bobina Principal	Bobina lateral série	
	distância	Tensão de saída	Tensão de saída	
Corrente 30 A	40	165,00 mV	144,07 mV	3
	50	176,7 mV	134,55 mV	7
	60	188,05 mV	123,43 mV	11
	70	197,65 mV	110,9 mV	15
	80	208,15 mV	95,25 mV	19

		Bobina Principal	Bobina lateral série	
	distância	Tensão de saída	Tensão de saída	
Corrente 40 A	40	220,15 mV	192,2 mV	4
	50	235,75 mV	179,5 mV	8
	60	250,75 mV	164,5 mV	12
	70	263,7 mV	147,95 mV	16
	80	277,7 mV	127,1 mV	20

Figura B.2: Testes do núcleo final

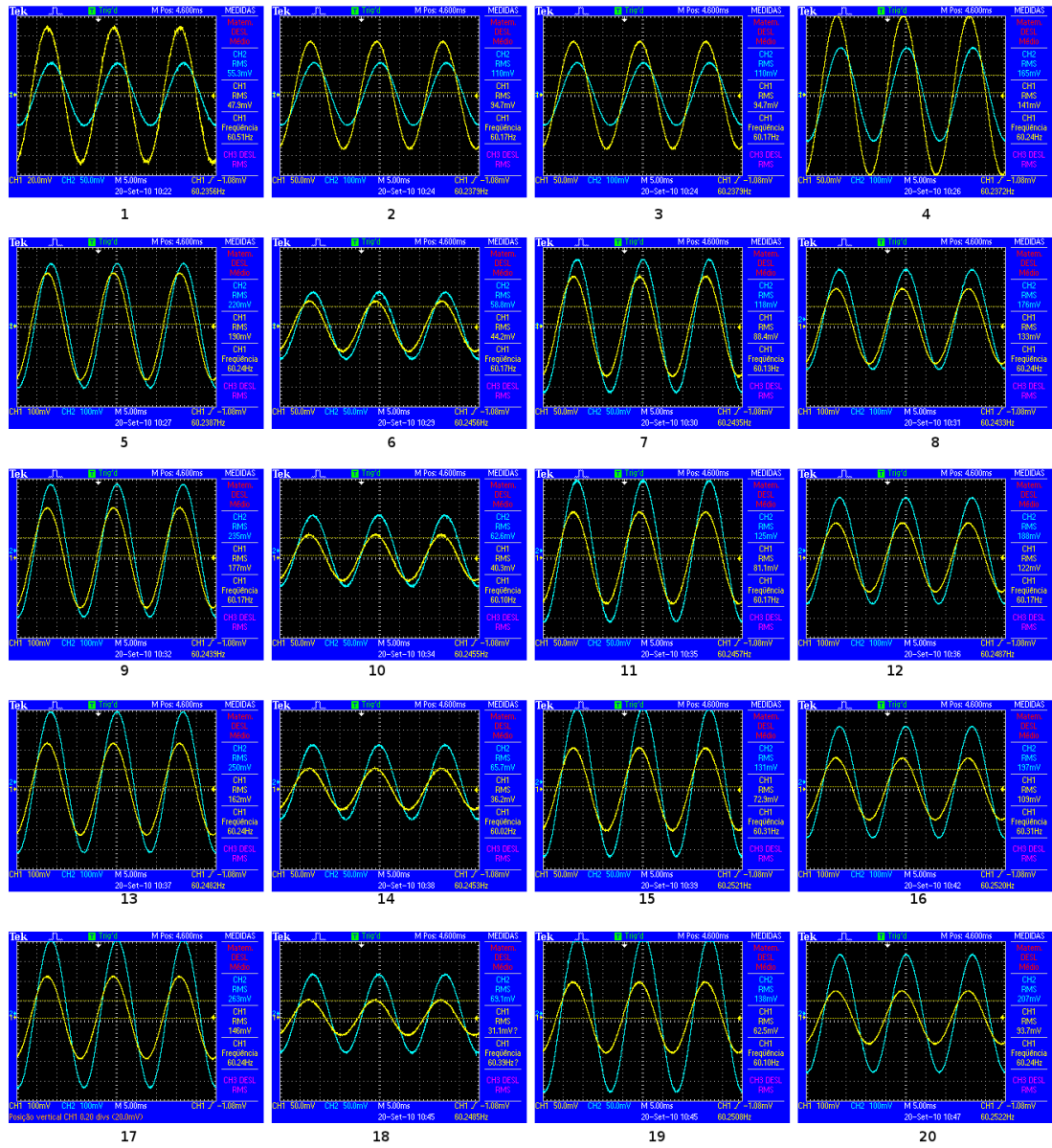



Figura B.3: Formas de onda no núcleo com bobinas de compensação

Apêndice C

Testes de transdutor de tensão

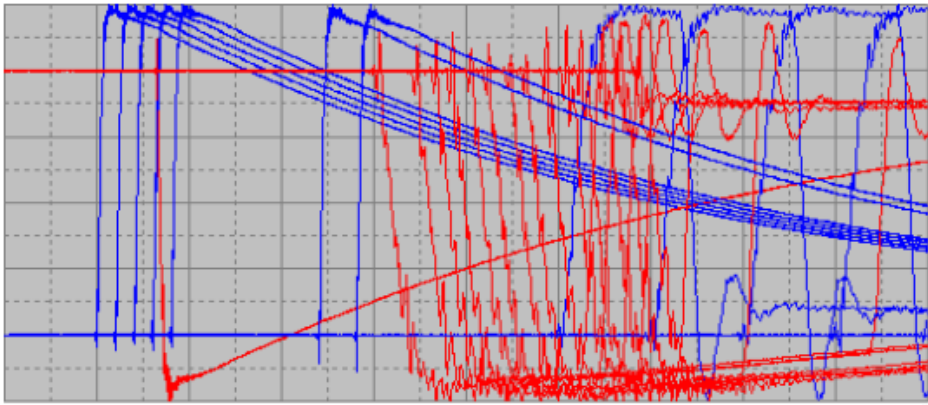
C.1 Ensaio em isolador inicial

Este ensaio foi decisivo para a aplicação de dois resistores de 200 MOhm no interior do isolador final. A tensão de ruptura verificada nos testes de tensão aplicada e suportabilidade a impulsos não permite que o equipamento seja aplicado em redes de 34,5 kV.

Tabela C.1: Ensaio de tensão aplicada inicial

Tensão aplicada pela fonte Biddle	Temperatura do Isolador
5	13
10	13
15	13
20	13
25	13
30	14
35	16
40	17
44	Desarmou a fonte

Figura C.1: Ensaio de tensão aplicada inicial

LACTEC

INSTITUTO DE TECNOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO

RELATÓRIO

ANEXO / PÁGINA

ENSAIO DE TENSÃO SUPORTÁVEL SOB IMPULSO

CLIENTE	MARCA	TIPO	TENSÃO NOMINAL
			kV
AMOSTRA / CONFIGURAÇÃO	TENSÃO SUPORTÁVEL	CONDIÇÃO DO ENSAIO	DISTÂNCIA DE DESCARGA
am os2	80 kV	☑ SECO ☐ CHUVA	0,28 m
NUMERO DE ESTÁGIOS (G.I.)	TIPO DO DIVISOR DE TENSÃO	FATOR DE ESCALA	FORMA DE ONDA
2s/1p		265,1	0,98 / 47,282
TEMPERATURA A SECO	TEMPERATURA ÚMIDA	PRESSÃO ATMOSFÉRICA	FATOR DE CORREÇÃO
27,1 °C	24,1 °C	685,8 mmHg	0,996

OSCILOGRAMAS DE TENSÃO

HORIZONTAL: 10 µs/div

POLARIDADE POSITIVA						POLARIDADE NEGATIVA					
APLIC.	TENSÃO DE CARGA (kV)	TENSÃO DE CRISTA (kV)	TENSÃO PROSPEC. (kV)	TENSÃO CORRIGIDA (kV)	TEMPO DE CORTE (µs)	APLIC.	TENSÃO DE CARGA (kV)	TENSÃO DE CRISTA (kV)	TENSÃO PROSPEC. (kV)	TENSÃO CORRIGIDA (kV)	TEMPO DE CORTE (µs)
1	43,7	80,6	80,6	80,9	-	1	30,0	56,2	56,2	56,4	1,66
2	45,0	82,6	82,6	82,9	-	2	35,0	58,3	58,3	58,5	-
3	47,5	87,1	87,1	87,4	-	3	35,0	60,9	60,9	61,1	1,38
4	50,0	91,6	91,6	92,0	-	4	35,0	66,5	66,5	66,8	9,6
5	60,0	110,2	110,2	110,6	-	5	35,0	65,3	65,3	65,6	4,98
6	65,0	119,5	119,5	120,0	2,66	6	40,0	76,0	76,0	76,3	1,64
7	60,0	110,0	110,0	110,4	3,04	7	40,0	74,9	74,9	75,2	2,48
8	55,0	101,0	101,0	101,4	3,4	8	40,0	74,1	74,1	74,4	2,48
9	50,0	91,8	91,8	92,2	2,76	9	40,0	74,7	74,7	75,0	2,54
10	45,0	82,6	82,6	82,9	3,74	10	40,0	65,7	65,7	66,0	4,4
11	40,0	73,7	73,7	74,0	4,08	11	30,0	57,6	57,6	57,8	1,4
12	35,0	64,9	64,9	65,2	6,06	12	30,0	57,1	57,1	57,3	1,32
13	30,0	55,7	55,7	55,9	-	13	30,0	57,3	57,3	57,5	1,68
14	30,0	56,8	56,8	57,0	1,56	14	30,0	57,4	57,4	57,6	1,66
15	30,0	56,1	56,1	56,3	-	15	30,0	57,1	57,1	57,3	1,68

OBSERVAÇÕES

Curitiba, terça-feira, 18 de maio de 2010

RESPONSÁVEL PELO ENSAIO

INSPETOR

Figura C.2: Ensaio de suportabilidade a impulsos

C.2 Nível de ruído do divisor resistivo Caddock

Ensaio realizado por 12 horas monitorando o nível de ruído no resistor de baixa ordem do divisor resistivo completo sem em aberto.

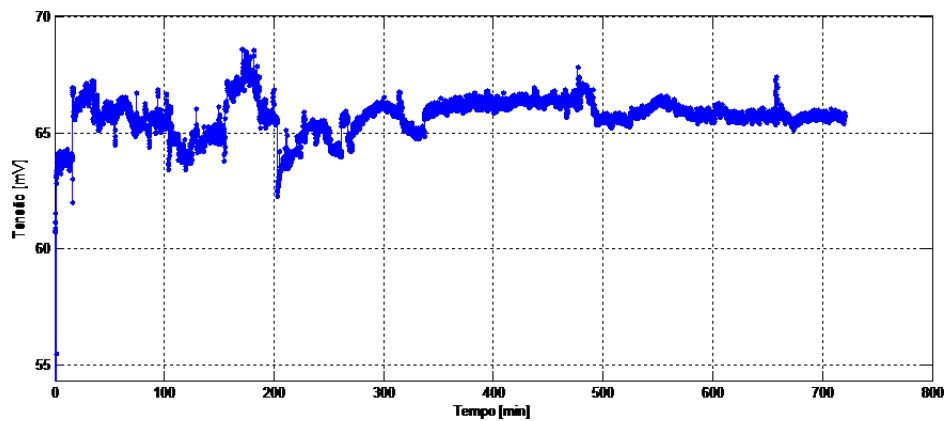



Figura C.3: Nível de ruído do divisor resistivo

C.3 Ensaio em isolador sem blindagem

Estes ensaios mostraram que a versão do isolador sem a blindagem é aplicável a redes de 35 kV.

Ensaio de Tensão Suportável de Impulso Atmosférico

O ensaio consiste em aplicar 15 impulsos em ambas polaridades sendo que é permitido até duas disrupções:

O valor da tensão aplicada foi de 165 kV sem correção atmosférica.

Os resultados encontrados foram os seguintes:

Polaridade Positiva:

Aplicação	Tensão Crista (kV)	Disrupção
1	165,3	
2	168,3	
3	166,9	
4	168,8	
5	169,8	
6	170,0	
7	170,8	
8	170,1	
9	170,0	
10	170,8	
11	169,1	
12	170,6	
13	170,4	
14	168,9	
15	169,1	

Polaridade Negativa:

Aplicação	Tensão Crista (kV)	Disrupção
1	188,0	
2	185,0	
3	190,3	
4	182,5	
5	180,5	
6	179,2	
7	178,0	
8	175,5	
9	175,0	
10	174,7	
11	174,4	
12	175,2	
13	173,8	
14	173,4	
15	173,6	

Pressão barométrica..707mmHg

Temperaturas:
- termômetro de bulbo seco:..25°C
- termômetro de bulbo úmido:..21°C

Rua Santa Cruz, 1550 - Bairro Santa Cruz - Mogi Mirim - SP - CEP 13800-911 - CP 80 - Fone (19) 3814-9000 - www.balestro.com

Figura C.4: Ensaio de suportabilidade a impulsos

C.4 Ensaio em isolador final

Estes ensaios mostraram que a versão do isolador sem a blindagem é aplicável a redes de 15 kV.

Ensaio:	Ensaio de Tensão Suportável de Impulso Atmosférico				
Data:	13/12/2011		Pressão atm.	705	mmHg
Dist.Esc:			Temp. Bulbo Seco	28	°C
Gerador:	2x200kV		Temp. Bulbo Umido		°C
F. Onda:	1,2/50	us	Umidade Relativa	44	%

POLARIDADE		POS.		POLARIDADE		NEG.
Aplicação	Tensão Crista (kV)	Disrupção		Aplicação	Tensão Crista (kV)	Disrupção
1	97,3			1	98,2	
2	96,9			2	96,1	
3	97,1			3	94,7	
4	97,2			4	94,8	
5	97,3			5	95,8	
6	96,9			6	94,7	
7	96,7			7	99,3	
8	96,4			8	96,3	
9	97,0			9	96,7	
10	97,2			10	97,1	
11	96,5			11	97,0	
12	96,4			12	96,5	
13	96,9			13	96,9	
14	96,4			14	96,6	
15	97,4			15	96,8	
MEDIA	96,9			**MEDIA**	96,5	

Tensão Suportável a seco 60HZ			
Tensão (kV)	Tempo (s)	Disrupção	Resultado
34,0	60,0	Não	Aprovado

Figura C.5: Ensaio de suportabilidade a impulsos